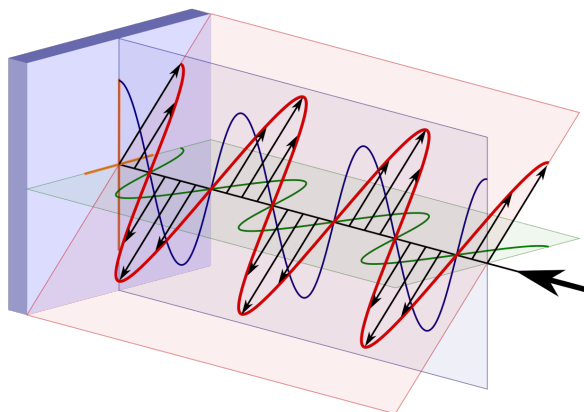


**Фокин В. М., Ковылин А. В., Усадский Д. Г.**

# **ТЕПЛОЗВУКОВАЯ АНАЛОГИЯ**

Под редакцией доктора наук В. М. Фокина



Санкт-Петербург  
2023

В. М. Фокин, А. В. Ковылин, Д. Г. Усадский

# **ТЕПЛОЗВУКОВАЯ АНАЛОГИЯ**

Монография

Под редакцией доктора наук В. М. Фокина

Санкт-Петербург  
Научно-технологические  
2023

УДК 536.24: 620.179.1.05

ББК 31.312.06

Ф75

Рецензенты:

*Владимир Николаевич Чернышов* – доктор технических наук, профессор,  
Тамбовский государственный технический университет;

*Алексей Геральдович Бойков* – кандидат технических наук, доцент,  
Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет.

**Фокин В. М., Ковылин А. В., Усадский Д. Г.** Теплозвуковая аналогия. Монография / под ред. В. М. Фокина. – СПб: Научное издание, 2023. – 263 с.

ISBN 978-5-907618-48-0

Монография посвящена разработке научно-методологических основ для экспериментального определения теплофизических и звукофизических свойств твердых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий методом температурных волн и неразрушающего контроля. Математическим исследованием и логистикой выявлены параметры, зависимости и критерии, характерные для процесса распространения температурных и звуковых волн в материалах, а также в ограждениях зданий и сооружений. Тепло-звуковая аналогия позволила установить закон температурной волны и закон температурного ощущения, а также впервые применить новые тепло-звукофизические параметры. Приведены обоснования и методики для определения тепло-звукофизических свойств (ТЗФС) материалов, основанные на измерении температур и тепловых потоков на поверхности изделий, методом неразрушающего контроля.

Монография предназначена для научных, инженерно-технических работников, преподавателей вузов, аспирантов, магистров, студентов.

УДК 536.24: 620.179.1.05

ББК 31.312.06

© Фокин В. М., 2023

© Ковылин А. В., 2023

© Усадский Д. Г., 2023

ISBN 978-5-907618-48-0

## ОТ ДОКТОРА НАУК

---

Открытие часто делается тогда,  
когда все знают, что этого не может  
быть, а кто-то этого не знает.  
Он то и делает это открытие.

*Альберт Эйнштейн*

Наука — это система знаний об объективных законах природы. За вторую половину двадцатого века получено более половины сведений от объема знаний, накопленных человечеством за всю историю. Большинство видов производств и технологий первоначально зарождаются в недрах науки. Такие предположения и мысли высказываются многими учеными.

Некоторые считают, что научными исследованиями должны заниматься особенно одаренные люди. С этим утверждением можно согласиться лишь при условии, что одаренный человек способен сделать больше, быстрее.

Другие полагают, что надо иметь достаточно высокий предварительный запас знаний. В какой-то мере это помогает. Однако есть люди, обладающие огромными познаниями и в то же время не имеющие ни одной собственной мысли. Многие изобретатели и экспериментаторы показали, что наряду с талантом большое значение имеет количество вложенного труда. Наука — это труд, результаты которого дают принципы действия, новые технологии, новые экономические эффекты.

Образно говоря, сегодня в науке довольно «тесно». Коллективы родственных специальностей многих вузов, научно-исследовательских и проектных институтов и фирм работают в совпадающих направлениях. Поэтому «на поверхности все уже разобрано» и для выбора актуальной тематики приходится «внедряться в более глубокие слои материи». Это и плохо, и хорошо. Плохо потому, что много дублирования, а хорошо, потому что происходит количественное накопление, которое переходит в качественное. Когда-то академик Н. Н. Семенов сказал: «Из множества монографий и диссертаций уже можно кое-что выбрать...»

Авторы далеки от того, чтобы считать вполне достаточным для подготовки наших научных кадров, бакалавров, магистров и инженеров, предложенную монографию. Со стороны будут виднее и ошибки, и промахи. Может быть, когда-нибудь их удастся учесть и исправить.



## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

*Звезду замечают на небосводе, когда она падает*

Монография посвящена разработке научно-методологических основ для экспериментального определения теплофизических и звукофизических свойств в твердых строительных, теплоизоляционных, облицовочных, композиционных материалах и изделиях, а также в ограждениях зданий и сооружений методом температурных и неразрушающего контроля.

Математическим исследованием и логистикой выявлены параметры, зависимости и критерии, характерные для процесса распространения температурных и звуковых волн в материалах, а также в ограждениях зданий и сооружений. Тепло-звуковая аналогия позволила установить закон температурной волны и закон температурного ощущения, а также впервые применить новые тепло-звукофизические параметры. В монографии приведены обоснования и новые методики для определения тепло- звукофизических свойств (ТЗФС) материалов, основанные на измерении температур и тепловых потоков на поверхности изделий, методом неразрушающего контроля.

Разработанные впервые методики позволяют установить волновое число, долю проникновения температурных и звуковых волн, начало наступления упорядоченной части теплового периода по тепловым и температурным изменениям на поверхности, а также определять комплекс ТЗФС.

В монографии приведены основы математических и физических экспериментов, приборное обеспечение, методические указания по созданию экспериментальных установок и проведению опытов, а также физические исследования комплексного определения ТЗФС материалов и изделий методом, в том числе методом неразрушающего контроля. При различных условиях нагрева и охлаждения тел приведены результаты экспериментального определения теплопроводности и теплоусвоения, теплопроводности и звукопроводности, температуропроводности, объемной и весовой теплоемкости, а также других ТЗФС твердых строительных, теплоизоляционных материалов и изделий (оргстекло, фторопласт, бетон, красный и силикатный кирпич), металлов, а также наружных ограждений зданий и сооружений.

Тепло-звуковая аналогия, как диагностика позволяет контролировать ТЗФС материалов, а также качество готовых изделий при различных режимах их эксплуатации, в процессе производства изделий, а также на стадии технологического контроля или в ходе строительства на объекте.

Главы 1, 2, 5...10 написаны совместно всеми авторами, а главы 3 и 4 сформулировал доктор наук, профессор Фокин В. М.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

---

- $T, t$  — текущая температура по шкале Кельвина, К, и Цельсия, °С;
- $T_0, t_0$  — начальная температура тела, К, °С;
- $T_C, t_C$  — температура окружающей среды, К, °С;
- $T_H, t_H$  — температура нагревателя, К, °С;
- $T_X, t_X$  — температура холодильника, К, °С;
- $T_{\Pi}, t_{\Pi}$  — температура на поверхности тела (пластины), К°, С;
- $T_{\Pi 1}, t_{\Pi 1}$  — температура на нагреваемой поверхности пластины, К°, С;
- $T_{\Pi 2}, t_{\Pi 2}$  — температура на охлаждаемой поверхности пластины, К°, С;
- $T_{\Pi 1}^*, t_{\Pi 1}^*$  — температура на нагреваемой поверхности пластины  
в стационарном тепловом режиме, К, °С;
- $T_{\Pi 2}^*, t_{\Pi 2}^*$  — температура на охлаждаемой поверхности пластины  
в стационарном тепловом режиме, К, °С;
- $\Delta T_*, \Delta t_*$  — разность температур на внешней и внутренней поверхности  
пластины в стационарном тепловом режиме, К, °С;
- $\vartheta = (T - T_0)$  — избыточная температура, К, °С;
- $\theta_T, \theta_A$  — безразмерная относительная доля проникновения избыточной  
температуры или избыточного давления звуковой волны;
- $\vartheta_{\Pi}$  — амплитуда температурной волны на поверхности изделия, °С;
- $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда температурной волны на  
поверхности изделия (пластины, ограждения), °С;
- $\vartheta_{\Pi d}^*$  — максимальная амплитуда температурной волны в пластине  
при стационарном тепловом режиме, °С;
- $Q$  — полный тепловой поток, Вт;
- $q$  — удельный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;
- $q_{\Pi}$  — плотность теплового потока на поверхности изделия, Вт/м<sup>2</sup>;
- $q_{\Pi}^{max}$  — максимальный тепловой поток на поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;
- $q_{\Pi}^{min}$  — минимальный тепловой поток на поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{\text{пл}}^*$  — плотность теплового потока в пластине при достижении стационарного теплового режима, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $V$  — объем, м<sup>3</sup>;  
 $m$  — масса вещества, кг;  
 $F$  — площадь поверхности тела или поперечное сечение, м<sup>2</sup>;  
 $L, l, \delta$  — линейный размер, толщина пластины, ограждения, м;  
 $\rho$  — удельная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_{\text{п}}$  — поверхностная плотность материала, кг/м<sup>2</sup>;  
 $c$  — массовая (весовая) изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);  
 $(c\rho)$  — объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  
 $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К);  
 $a$  — температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  
 $R_{\text{пл}}, R_{\text{ст}}$  — термическое сопротивление теплопроводности пластины, стены, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  
 $\tau$  — время, с;  
 $\tau_{\text{р}}$  — время наступления регулярного теплового режима или время достижения максимального теплового потока, с;  
 $\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима в пластине, с;  
 $\tau_{\text{э}}$  — эргономическое время наступления температурного ощущения, с;  
 $\tau_{\text{э}}^*$  — эргономическое время наступления болевого порога, с;  
 $C_{\text{а}}$  — скорость звука (акустическая) в материале, м/с;  
 $W_{\text{тр}}$  — объемная скорость звуковых волн в трубах, м<sup>3</sup>/с;  
 $z_{\text{а}}$  — удельное акустическое сопротивление (Па·с)/м;  
 $Z_{\text{тр}}$  — волновое акустическое сопротивление в трубах, (Па·с)/м<sup>3</sup>;  
 $Z$  — полное сопротивление звуковых волн (Па·с·м);  
 $S_{\text{п}}$  — поверхностная скорость плоской температурной волны, м/с;  
 $S_{\text{п}}^*$  — поверхностная скорость плоской температурной волны при условной толщине пластины  $\delta = 1$  м (изделия), м/с;  
 $P_{\text{т}}$  — тепловое (термическое) давление, Па;

$\psi$  — термическое напряжение удельное, Па·м;  
 $\psi_{\text{П}}$  — термическое напряжение на поверхности, Па·м;  
 $\nu, f$  — частота температурных и акустических колебаний, с<sup>-1</sup>;  
 $z$  — полный (циклический) период температурных колебаний, с;  
 $\omega_{\text{А}}$  — угловая (круговая) частота колебаний акустической волны, с<sup>-1</sup>;  
 $\omega_{\text{Т}}$  — угловая (круговая) частота колебаний температурной волны, с<sup>-1</sup>;  
 $k$  — волновое число, м<sup>-1</sup>;  
 $k_{\text{А}}$  — волновое число плоской звуковой (акустической) волны, м<sup>-1</sup>;  
 $k_{\text{Т}}$  — волновое число плоской температурной волны, м<sup>-1</sup>;  
 $k_{\text{Т}}^{\text{ПЛ}}$  — волновое число плоской температурной волны в пластине, м<sup>-1</sup>;  
 $k_{\text{Т}}^{\text{СТ}}$  — волновое число плоской температурной волны стены, м<sup>-1</sup>;  
 $L_{\text{Т}}$  — глубина проникновения температурной волны, м;  
 $L_{\text{А}}$  — глубина проникновения звуковой (акустической) волны, м;  
 $L_{\text{Ф}}$  — длина свободного пробега фононов, м;  
 $\mathcal{E}$  — плотность звуковой энергии, Дж/м<sup>3</sup>;  
 $\mathcal{E}_{\text{Т}}$  — плотность тепловой энергии, Дж/м<sup>3</sup>;  
 $B$  — коэффициент теплоусвоения, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $b$  — тепловая инерция, Дж<sup>2</sup>/(с·м<sup>4</sup>·К<sup>2</sup>);  
 $b_*$  — тепловая активность, Дж/(с<sup>0,5</sup>·м<sup>2</sup>·К);  
 $R_{\text{ЗВ}}$  — звукоизоляция изделия, дБ;  
 $R_{\text{ТЕРМ}}$  — термоизоляция изделия, дБ;  
 $\alpha_{\text{ПР}}$  — коэффициент звукопроводности (звукопроводность);  
 $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  — коэффициент термопроводности (термопроводность);  
 $J$  — интенсивность звука, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\Lambda$  — длина звуковой волны, м;  
 $\mathcal{L}$  — уровень акустического параметра, дБ;  
 $\mathcal{E}_{\text{А}}$  — уровень звукового (акустического) ощущения, дБ;  
 $\mathcal{E}_{\text{Т}}$  — уровень температурного ощущения, дБ;  
 $\beta$  — темп нагрева, К/с, °С/с;

$E_p$  — модуль упругости Юнга, Па;

$M$  — десятичный логарифм натурального числа  $e$  ( $\lg e = 0,43429$ );

$H$  — безразмерное волновое число ( $H = k \cdot \delta$ );

$\Phi_K$  — безразмерное число волновой скорости, число Фокина:  $\Phi_K = S_{II}^*/C_A$ ;

$F_0$  — число Фурье или безразмерное время ( $F_0 = \frac{a \cdot \tau}{\delta^2}$ ).

### ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

$$\rho_{II} = \rho \cdot \delta, \text{ кг/м}^2;$$

$$\rho = \rho_{II}/\delta, \text{ кг/м}^3;$$

$$S_{II} = \delta/\tau_*, \text{ м/с};$$

$$S_{II}^* = a/\delta, \text{ м/с};$$

$$a = S_{II} \cdot \delta, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$a = \lambda/(c\rho), \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda = (q_{II} \cdot \delta)/\Delta T_* = (q_{II} \cdot \delta)/(T_H - T_X) = (q_{II} \cdot \delta)/(T_{II1}^* - T_{II2}^*), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$\lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$(c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$S_{II} = \lambda/[(c\rho) \cdot \delta], \text{ м/с};$$

$$S_{II} = \lambda/(c \cdot \rho_{II}), \text{ м/с};$$

$$c = \lambda/(S_{II} \cdot \rho_{II}), \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$(c\rho) = \lambda/(S_{II} \cdot \delta), \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$\mathcal{E}_T = q_{II}/S_{II}, \text{ Дж/м}^3;$$

$$S_{II} = q_{II}/\mathcal{E}_T, \text{ м/с};$$

$$\mathcal{E}_T = (c\rho) \cdot \Delta T_*, \text{ Дж/м}^3;$$

$$(c\rho) = \mathcal{E}_T/\Delta T_*, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$\Psi_{II} = P_T \cdot \delta, \text{ Па} \cdot \text{м};$$

$$\omega_A = 2\pi f, \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_T = 2\pi/z, \text{ с}^{-1};$$

$$k_A = \omega_A/C_A, \text{ м}^{-1};$$

$$k_T = \sqrt{\omega_T/2a}, \text{ м}^{-1};$$

$$q_{\Pi} = \sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T \cdot \vartheta_{\Pi}, \text{ Вт/м}^2;$$

$$\vartheta_{\Pi} = q_{\Pi}/(\sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T), \text{ К, } ^\circ\text{С};$$

$$k_T = q_{\Pi}/(\sqrt{2} \cdot \lambda \cdot \vartheta_{\Pi}), \text{ м}^{-1};$$

$$k_T = B/(\sqrt{2} \cdot \lambda) = 0,71(B/\lambda), \text{ м}^{-1};$$

$$B = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)} \cdot \omega_T, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$B = (c\rho) \sqrt{a \cdot \omega_T}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$B = q_{\Pi}^{\max}/\vartheta_{\Pi}^{\max}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$b = \lambda \cdot (c\rho), \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2);$$

$$b_* = \sqrt{b}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$b_* = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$b_* = \lambda \cdot \sqrt{a}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$M = \lg e = 0,43429;$$

$$H = k \cdot \delta;$$

$$H_A = k_A \cdot \delta;$$

$$H_T = k_T \cdot \delta;$$

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 10 M \cdot k_T \cdot \delta = 10 M \cdot H_T, \text{ дБ};$$

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ТЕРМ}}), \text{ дБ};$$

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T \cdot \delta) = 4,34 H_T;$$

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1 R_{\text{ТЕРМ}}};$$

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-M \cdot k_T \cdot \delta} = 10^{-M \cdot H_T};$$

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot \delta);$$

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi});$$

$$S_{\Pi}^2 = \Phi_K (\psi_{\Pi}/\rho_{\Pi}), \text{ м}^2/\text{с}^2;$$

$$\Phi_K = S_{\Pi}^*/C_A;$$

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K, \text{ м/с};$$

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho, \text{ Па};$$

$$Fo = (a \cdot \tau)/\delta^2.$$

## ВВЕДЕНИЕ

---

*Тепло-звуковая аналогия — это дегустация новой реальности теплофизики.*

В научной и технической литературе рассмотрены исследования в области теплофизических свойств (ТФС) и методов [1, 4, 8, 17, 27, 29, 34, 41, 46, 49, 57, 75, 79...83, 115, 116], а также акустических, звуковых или звукофизических свойств (ЗФС) твердых материалов и изделий [2, 26]. Для определения ТФС материалов предложены различные методы теории теплопроводности, методы неразрушающего контроля, а также энергоэффективные методы контроля и патенты. Температурные и звуковые волны рассмотрены в технической теплофизике и энергоэффективных методах неразрушающего контроля. При исследованиях используется и электротепловая аналогия.

Для определения ЗФС разработаны теоретические основы [26], измерительная аппаратура и оборудование [2]. Эффективность звукоизоляции ограждений оценивается индексом изоляции воздушного шума в децибелах, а звукопоглощение оценивают с помощью безразмерного коэффициента звукопоглощения. Для расчёта эффективности звукоизоляции используют значения теплопроводности, частоты звука, поверхностной плотности.

Однако связи между тепловыми и акустическими измерениями не рассмотрены, поэтому в монографии впервые предлагается новый энергоэффективный комплексный способ определения теплофизических и звукофизических свойств (ТЗФС) строительных, теплоизоляционных, облицовочных и других твердых материалов и изделий методом тепло-звуковой аналогии и неразрушающего контроля. В монографии скорректированы обозначения параметров ввиду их схожести в тепловых и звуковых физических свойствах.

Температурные и звуковые волны распространяются в твердых телах по одним и тем же законам с различием в скорости звука и температуры в теле [26, 94], частоты колебаний или их длиной волны, временем прохождения температурных или акустических волн, временем экспериментальных исследований, характером плотности тепловой и звуковой энергии.

Особое внимание уделено температуропроводности веществ, материалов и изделий. Именно температуропроводность, как теплофизический параметр, и скорость звука, как звукофизический параметр, определяют основы тепло-звуковой аналогии. Кроме того, температуропроводность является паспортной характеристикой существующих и вновь разрабатываемых материалов, а как теплофизический параметр, является эффективным инструментом в научных исследованиях.

В современных реальных условиях зданий и сооружений чаще всего встречаются ограждения зданий, состоящие из «пирога» соприкасающихся отдельных материалов (в том числе и новых), технических данных по которым нет в справочной и технической литературе. Возникает необходимость определения именно эквивалентных (объединённых) тепло-звукофизических свойств ограждений зданий и помещений. Кроме того, исследованиями установлено, что ТЗФС различных материалов и изделий могут изменяться в процессе эксплуатации и не соответствовать их сертификату. Поэтому, при возведении объектов в ходе строительства, при их производстве и эксплуатации необходимо уметь определять ТЗФС материалов и изделий и эту задачу, возможно, решить только при совершенствовании известных и разработки новых энергоэффективных методов неразрушающего контроля, позволяющих комплексно определять как теплофизические, так и звукофизические свойства материалов изделий, перегородок, стен и ограждений.

Кроме того, ТЗФС строительных, теплоизоляционных материалов и изделий, ограждений зданий существенно влияют на тепловой, воздушный и экологический режим сооружений различного назначения, а также работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии.

Наиболее полную информацию о ТЗФС исследуемых материалов и изделий содержит температурное поле, определяемое из решения краевых задач теплопроводности для соответствующих тепловых воздействий и условий проведения теплофизического эксперимента. Для создания математических моделей тепловых процессов в физических объектах или исследуемых образцах вид и режим теплового воздействия, форму нагревателя и условия проведения эксперимента выбирают таким, чтобы с помощью несложных математических зависимостей адекватно описать физику процесса.

В последнее время появляется тенденция проводить исследования ТЗФС материалов так, чтобы результаты измерений параметров были многомерными показателями, например температура на поверхности и плотность теплового потока, либо амплитуда и период температурного колебания. С другой стороны, сами измерения, например температуры на поверхности образца и плотности теплового потока, содержат данные, которые могут описывать целый ряд других параметров. Предпринималось значительное число попыток для отыскания таких видов преобразований первичных данных, которые обеспечивали бы зависимость каждой составляющей результата измерений только от одного или двух измеряемых параметров и нечувствительность к измерениям других параметров. Иногда это удается сделать.



Монография по тепло-звуковой аналогии предназначена для научных исследований в теплофизике, математическом и физическом эксперименте, расчетов тепло-звукофизических (ТЗФС) свойств различных строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов (веществ) и изделий, а также твердых материалов и металлов. В работе впервые вводятся формулы, определения и понятия: поверхностная плотность изделия, поверхностная скорость плоской температурной волны, плотность энергии вещества, термическое напряжение, тепловое (термическое) давление, безразмерное число волновой скорости, теплопроводность, термоизоляция (в отличие от теплоизоляции), а также эргономические характеристики по уровню температурного ощущения и болевого порога. В работе впервые сформулирован закон температурной волны, закон температурного ощущения, а также скорректирован физический смысл температуропроводности вещества (материала).

Математический эксперимент по тепло-звуковой аналогии позволит значительно модернизировать в лучшую сторону экспериментальные установки, устройства и приборы, повысить их технические характеристики, совершенствовать алгоритм расчетов ТЗФС материалов и изделий, более современно взглянуть на физический эксперимент и физический смысл отдельных коэффициентов и параметров. Тепло-звуковая аналогия, её новые понятия и параметры позволят упростить и ускорить экспериментальное определение ТЗФС тел сложной конфигурации и формы, таких как: пустотелый кирпич, стеклоблоки, сайдинг, шифер, металочерепица и другой профиль.

Тепло-звуковая аналогия и введение новых параметров ТЗФС значительно расширит возможность тепло-звукофизического эксперимента существующих приборов, а также методов неразрушающего контроля. Для этого в работе проведен вначале математический эксперимент, а затем и физический эксперимент для отдельных строительных и теплоизоляционных материалов и изделий, металлов, а также ограждений зданий и сооружений, перегородок и стен.

Разработанные методы выгодно отличаются от известных методов быстройдействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью. Кроме того, методики по тепло-звуковой аналогии позволяют легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому являются перспективными для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТЗФС материалов, в технической теплофизике, строительной тепло-технике и различных отраслях народного хозяйства.

# ГЛАВА 1 ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

---

## 1.1 Обзор методов теплообмена и тепловых режимов

При нагреве или охлаждении твердых тел наблюдается несколько характерных тепловых режимов, протекающих последовательно: начальный и упорядоченный, если граничные условия симметричные; начальный, упорядоченный и стационарный, если граничные условия несимметричные. Начальный тепловой период определяется исходным состоянием системы и описывается сложными математическими соотношениями.

Упорядоченный режим наступает по истечении некоторого отрезка времени от начала процесса, когда внешнее тепловое воздействие затронет в какой-то мере центральные участки объема ограждения. Обычно эта стадия, в отличие от начального теплового периода, описывается более простыми аналитическими выражениями. Упорядоченный тепловой режим асимптотически подходит к равновесному термодинамическому равновесию (при симметричном распространении теплоты) или вписывается в стационарную стадию (при несимметричных краевых условиях).

Существует множество способов и методов отдельного и комплексного определения теплофизических свойств материала ограждения здания, использующих весь диапазон нагрева — от начального до стационарного. Все эти тепловые режимы широко применяют в инженерной практике, научных исследованиях и определения ТФС различных материалов.

*Условия однозначности* включают в себя геометрические, физические, временные и граничные условия.

Геометрические условия характеризуют геометрические и линейные размеры системы, в которой протекает процесс. Физические условия характеризуют физические характеристики среды и тела. Временные или начальные условия характеризуют особенности протекания процесса во времени или распределение температуры внутри тела в начальный момент времени. Граничные условия характеризуют процессы теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

Граничные условия задаются несколькими возможными случаями:

- 1 рода — задано распределение температуры на поверхности тела;
- 2 рода — задано распределение теплового потока на поверхности тела;
- 3 рода — задана температура окружающей среды и закон теплообмена между средой и поверхностью тела;

4 рода (условия сопряжения) — характеризуют процессы теплопроводности между соприкасающимися поверхностями различных тел, когда температура в точке сопряжения тел одинакова, но тепловые потоки разные.

Для экспериментального определения ТФС материалов применяют стационарные, нестационарные и комплексные методы.

Стационарные методы (стационарного теплового потока) основаны на законе теплопроводности Фурье [1, 3, 4, 19, 22, 27, 29, 43, 46, 47, 48, 51, 57, 79, 80, 81, 82, 97]. При реализации стационарных методов, исследуемому материалу (образцу) придается форма пластины, призмы, куба, цилиндра, сферической оболочки, для которых создается соответствующее одномерное температурное поле. Экспериментальное определение ТФС материалов сопровождается рядом побочных явлений: утечки теплоты через торцы, конвекция, излучение, скачек температуры на границе твердого тела и газа (жидкости). Для устранения тепловых потерь применяются разнообразные охранные нагреватели, кольца, колпачки. При использовании стационарных методов исследования, в процессе нагрева исследуемых влажных строительных и теплоизоляционных материалов, происходит перераспределение влаги, что искажает опытные данные.

Нестационарные методы определения ТФС материалов [23, 25, 30, 32, 38, 39, 40, 50, 57, 58, 61...70, 73, 87, 90...96, 98, 101, 103...105, 107, 110, 111] основаны на теории теплопроводности при нестационарном тепловом потоке. В нестационарных методах различают методы начальной стадии (число Фурье  $Fo \leq 0,55$ ) и методы регулярного режима ( $Fo \geq 0,55$ ). Методы регулярного режима в соответствии с [105] могут быть подразделены на группы методов регулярного режима первого, второго и других видов.

Из нестационарных методов для исследования ТФС материалов при температурах, близких к комнатным, наибольшее применение находят методы регулярного режима первого рода, а при температурах от минус 50 до плюс 80 °С — методы монотонного режима.

Из теории теплофизических измерений известно, что нестационарные методы, с точки зрения оперативности, полноты получаемой информации об объектах исследования и простоты реализации экспериментальных установок, являются более перспективными. В нестационарных методах исследования теплофизических характеристик веществ, по сравнению с стационарными, снижены требования к тепловой защите, затрачивается меньше времени и тепловой энергии для проведения эксперимента.

К недостаткам нестационарных методов следует отнести сложность расчетных уравнений и трудность оценки соответствия действительных граничных условий в эксперименте с условиями, принятыми в теории.

Для экспериментального определения ТФС материалов также используют комплексные методы [4, 25, 32, 39, 40, 50, 62...65, 69, 70, 73, 92, 94, 103, 104, 107, 110], которые в большинстве случаев, основываются на теории начальной и упорядоченной стадии нестационарной теплопроводности. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента, на одной установке и на одном образце несколько теплофизических свойств в широком интервале температур. При сохранении времени на проведение эксперимента комплексные методы позволяют получить более полную информацию о ТФС веществ. Если изготовление строго одинаковых по структуре образцов затруднительно (например, структура гетерогенных, анизотропных веществ), то осуществление эксперимента на одном образце комплексным методом, существенно повышает точность определения ТФС.

Среди перечисленных методов, особое место в определении ТФС веществ занимают тепловые методы неразрушающего контроля и диагностики (ТМНК). Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [62...65, 69, 73, 92, 94, 104].

Экспериментальные методы определения ТФС материалов могут быть абсолютными и относительными. В абсолютных методах определение параметров осуществляется непосредственным измерением. В относительных методах определяемые параметры зависят от постоянной прибора и определяются путем тарировки по эталонному веществу, материалу или образцу. Наиболее перспективными для определения ТФС материалов, являются и должны быть абсолютные методы исследований.

Для экспериментального определения ТФС материалов также используют температурные волны, распространяемые в полуограниченном пространстве [4, 30, 32, 64, 65, 66, 93, 94]. Это связано с тем, что многие явления природы подчиняются закону простого гармонического колебания. Только периоды таких колебаний для разных условий могут быть различными. Так, период наиболее резких колебаний температуры земли равен одному году. А для ограждающих конструкций жилого помещения он составляет одни сутки. Существуют примеры, когда температурные колебания исчисляются периодом в долях секунды. Большинство из них происходят по закону косинуса, однако даже самые сложные колебания все равно могут быть описаны путем наложения косинусоид.

Все методы и реализующие их измерительные средства разделяются на две группы: контактные и бесконтактные. Использование контактных методов превалирует в способах исследования и определения ТФС веществ и материалов [33, 35, 38, 39, 60, 69, 89, 90, 107].

Отличительной особенностью контактных методов является непосредственный контакт термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта измерения для определения температурного поля в зоне теплового воздействия. Для этого используют погружные или не погружные термоприемники или термопреобразователи [37, 40, 60, 68, 86, 108, 111, 116]. Однако в последнее время отмечается рост бесконтактных методов и измерительных средств [73, 92, 104, 110].

Закономерности распространения теплоты в твердых телах всегда привлекали внимание многих исследователей. Большой вклад в разработку методов определения теплофизических свойств материалов внесли: А. В. Лыков [106...108], В. Н. Богословский [46...48], Г. П. Бойков [4, 62, 91, 93], Ю. В. Видин [7, 8], В. В. Иванов [7, 23...25], Г. М. Кондратьев [28], В. В. Курепин [38...40], Е. С. Платунов [68...69], Л. П. Филиппов [98], В. Н. Чернышов [62, 63, 92, 94, 103], П. В. Черпаков [105], А. Г. Шашков [111], Н. А. Ярышев [117] и многие другие, в том числе зарубежные ученые Г. Карслоу, Д. Егер [29], О. Крейт, У. Блек [34], Куинн Т [36], Ли, Тейлор Э. М. [44], Мак Адамс В. Х. [49], Сперроу [75], Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. [116].

В монографии большое внимание уделено основам теории теплопроводности в пластине и в ограждении здания при циклическом подводе теплоты к его поверхности, исследованиям плотности теплового потока на поверхности тела или ограждения. Закономерности распространения температурных волн в полуограниченном пространстве или массиве ограждения включают в свою структуру весь комплекс теплофизических свойств материалов и позволяют определять ТФС.

## **1.2 Обзор методов определения ТФС материалов**

### **1.2.1 Метод регулярного теплового режима**

Теория регулярного режима была разработана Г. М. Кондратьевым [28] и в последующем углублена другими исследователями [27, 38, 41, 50, 51, 79, 81, 105, 117]. Метод регулярного теплового режима получил весьма широкое распространение в теплотехнических лабораториях по определению ТФС строительных, теплоизоляционных, облицовочных твердых, сыпучих и порошковых материалов, для определения температуропроводности  $a$ , теплопроводности  $\lambda$ , а также теплоемкости  $c$  материалов.

В регулярном тепловом режиме (граничные условия I рода), принято понимать упорядоченную, свободную от начальных условий стадию охлаждения (нагрева) тела в среде с постоянной температурой  $t_c = \text{const}$  и коэффициентом

теплоотдачи  $\alpha = \text{const}$ , а изменение температуры во времени для любой точки тела описывается показательной функцией:

$$\vartheta = t - t_c = A \cdot U \cdot e^{-m\tau},$$

где  $\vartheta$  — избыточная температура тела;  $t$  — температура в фиксированной точке тела;  $t_c = \text{const}$  — температура окружающей среды;  $A$  — коэффициент, зависящий от формы тела и начального распределения температур;  $U$  — функция координат;  $m$  — темп охлаждения (нагрева), величина постоянная и не зависящая от координат и времени  $\tau$ .

Исследование и определение ТФС материалов при невысоких температурах обычно проводят на образцах простой формы. Смысл эксперимента состоит в следующем: образец в форме пластины, шара, параллелепипеда или короткого цилиндра с начальной температурой  $t_0$  в начальный момент времени погружается в жидкость с температурой  $t_c$ , которая перемешивается с помощью мешалки и тем самым создается бесконечно большой коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  между жидкостью и телом. Коэффициент теплоотдачи, стремящийся к бесконечности, можно получить, если исследуемый образец поместить в кипящую воду.

Для определения темпа охлаждения по данным измерения температуры тела во времени строят график  $\ln \vartheta = f(\tau)$ , в котором  $m$  представляет собой угловой коэффициент линейного участка, характеризующего регулярный режим. Понятие «регулярный тепловой режим» может быть сформулировано так: это такой период нагрева (или охлаждения), когда натуральный логарифм избыточной температуры начинает изменяться во времени по закону прямой линии. Регулярная стадия опыта в телах простой формы с равномерным начальным распределением температур обычно наступает при значениях числа Фурье  $Fo > 0,5$ . Погрешность измерений составляет 4...7 %.

Теория регулярного режима, устанавливает зависимость темпа нагрева (охлаждения) тела от его физических характеристик, геометрической формы и размеров, а также условий теплообмена с окружающей средой. К наиболее распространенным методам, основанным на теории регулярного режима, относятся:  $a$ —калориметра, лямбдакалориметра, калориметра двух и более точек, бикалориметра, микрокалориметра. В этих методах обработка опытных данных сводится к определению темпа нагрева или охлаждения  $m$ .

Преимущества метода: 1) метод абсолютен, не требует эталонов с известными тепловыми характеристиками; 2) обеспечивает достаточно высокую точность эксперимента; 3) опыт идет непродолжительное время, а формулы для обработки экспериментальных результатов имеют простой вид.

Недостатки метода: 1) для эксперимента необходима капельная среда (жидкость); 2) опыт соответствует теории только при условии, когда температура окружающей среды  $t_c$  на протяжении всего опыта остается постоянной; 3) во избежание смачивания образца и проникновения влаги внутрь исследуемого материала его помещают в герметично закрытый стакан или его поверхность покрывают эпоксидной смолой или лаком; 4) опыты с сыпучими материалами приходится производить в специальных условиях (герметично закрытом стакане); 5) обязательно обеспечивать большой коэффициент теплоотдачи, путем перемешивания жидкости.

### 1.2.2 Метод квазистационарного теплового режима

Метод квазистационарного теплового режима устанавливается при нагреве тел постоянным во времени потоком теплоты (граничные условия II рода). На закономерностях квазистационарного теплового режима основано большое число методов по изучению теплофизических свойств материалов [1, 27, 48, 50, 51, 59, 80, 81]. Методы базируются на решении линейного уравнения теплопроводности для пластины, цилиндра, шара в случае нагрева их постоянным тепловым потоком или в среде с постоянной скоростью изменения температуры.

Если на поверхности тела действует постоянный тепловой поток, то температурное поле по его сечению принимает вид:

$$T = \kappa + b \cdot \tau + \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\mu_n^2 \cdot \tau}.$$

По истечении некоторого отрезка времени ( $\tau > \tau^*$ ) бесконечный ряд становится очень малым в сравнении с двумя первыми членами и им можно пренебречь. Оставшийся температурный комплекс имеет вид:  $T = \kappa + b \cdot \tau$ , где  $\kappa$  — начальная температура тела;  $b$  — скорость нагрева, К/с.

Для экспериментального исследования и определения теплофизических характеристик материалов удастся создать квазистационарный нагрев с достаточно высокой точностью. Так если неограниченную пластину толщиной  $2r$  нагревать постоянным тепловым потоком, то по истечении некоторого отрезка времени наступает так называемый квазистационарный тепловой режим. Температура на поверхности тела  $t_{\Pi}$  начинает изменяться во времени по закону прямой линии.

В процессе проведения опыта образец, выполненный в форме пластины, цилиндра или шара, нагревается с постоянной скоростью (постоянным тепловым потоком на поверхности) и замеряется температура тела вблизи поверхности и на оси. Можно замерять непосредственно и время запаздывания. На

основании измерений строится график зависимости  $t = f(\tau)$  для двух фиксированных точек, из которых определяются ТФС свойства.

На основе этого абсолютного метода разработан ряд сравнительных методов нагрева с постоянной скоростью [94]. Преимущества метода:

1) простота окончательного выражения для обработки экспериментальных данных; 2) быстрота проведения опыта.

Недостатки метода: 1) требуется качественная торцевая тепловая изоляция для того, чтобы образец соответствовал понятию неограниченная пластина; 2) необходимость проведения замеров температуры на поверхности нагревательного элемента, который обладает своей теплоемкостью и теплопроводностью, что вносит значительные погрешности в результаты опыта.

Методы, основанные на теории квазистационарного режима, позволяют определять теплофизические характеристики в широком интервале температур. Однако при исследовании ТФС материалов, греющий поток на поверхности тела должен в течение длительного промежутка времени сохранять постоянное значение. Реализация таких режимов нагрева, очевидно, не может быть осуществлена без специальной регулирующей аппаратуры.

Кроме того, необходимо достичь таких условий опыта, когда вся теплота от основных электрических нагревателей полностью уходила бы внутрь образца. Для этого используют установку в форме «многослойного пирога», где плоские образцы из одного и того же материала чередуются с плоскими тонкими электрическими нагревателями. Измерения температур производят в центральном образце и середине пакета. Чем больше слоев, тем продолжительнее квазистационарная часть процесса. Кроме того, в пакете необходимо учитывать теплоту, идущую на нагрев самого нагревателя. Таким образом, квазистационарные методы, несмотря на ряд их явных преимуществ перед другими, в общем случае использовать затруднительно, так как требуется громоздкая, дорогостоящая экспериментальная установка.

### **1.2.3 Метод монотонного теплового режима**

Методы монотонного теплового режима основываются на закономерностях приближенного анализа нелинейного уравнения теплопроводности [39, 68, 70, 107]. Под монотонным тепловым режимом принято понимать плавный разогрев или охлаждение тел в широком диапазоне изменения температуры со слабопеременным полем скорости внутри образца.

Методы монотонного теплового режима позволяют из одного опыта получить температурную зависимость исследуемого параметра во всем интервале нагрева образца и носят иногда название динамических методов.



Из методов монотонного режима для определения теплопроводности  $\lambda$  материалов используется метод тонкой пластины. Метод тонкой пластины основан на закономерностях монотонного разогрева исследуемого образца в режиме, когда его температурное поле остается близким к стационарному режиму и использует расчетные уравнения.

В качестве образцов используются диски диаметром 10...20 мм и толщиной 0,5...10 мм. Испытуемый образец помещается внутри металлического ядра  $\lambda$ -калориметра (ДК- $\lambda$ -400), окруженного теплозащитной оболочкой, и монотонно разогревается вместе с ним. При реализации метода обычно используется вторая пластина (или стержень) с известной теплоемкостью  $c_2$ , выполненная из металла с высокой теплопроводностью и контактирующая с поверхностью исследуемой пластины, благодаря чему обеспечивается совместный их разогрев.

Для определения температуропроводности материалов применяют метод непрерывного нагрева, аксиального или радиального разогрева. Метод непрерывного нагрева основан на закономерностях квазистационарного режима при монотонном изменении температуры образца, когда  $b \neq \text{const}$ .

Вышеприведенный метод получил дальнейшее развитие в варианте метода радиального и аксиального разогрева в монотонном режиме для определения температуропроводности твердых теплоизоляторов и полупроводников. Исследования проводятся на установках, основной рабочей частью которых служат:  $a$ -калориметры (ДК- $ac$ -400; ДК- $a$ -1000).

Метод  $c$ -калориметра (контактного тепломера) основан на закономерностях монотонного разогрева исследуемого образца, когда его температурное поле остается близким к стационарному (скорость разогрева составляет от 0,02 до 0,2 К/с). Метод может реализоваться в сравнительном и абсолютном вариантах и используется для исследования теплоемкости различных теплоизоляционных материалов.

Реальные условия выполнения экспериментов методом монотонного теплового режима не совпадают с теоретическими предпосылками, поэтому необходимо всегда вносить поправки на нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен. Исключение этих поправок конструктивным путем значительно усложняет схему приборов, включающую в себя узлы электропитания, водяного охлаждения, тепловых и температурных измерений, а в установках радиального разогрева — и форвакуумный насос, для создания вакуума.

#### 1.2.4 Методы теплового импульса или мгновенного источника

Методы теплового импульса [9, 38] позволяют определять теплофизические свойства в нестационарной области разогрева. В основе метода мгновенного источника лежит решение задачи охлаждения неограниченной пластины в неограниченной среде при наличии мгновенного источника, расположенного в середине пластины.

При использовании мгновенного источника теплоты, расположенного между пластинами, замеряют время, в течение которого достигается максимальная температура на противоположной поверхности образца.

Импульсный источник теплоты мгновенно ( $\approx$  за 0,5...2,5 с) нагревается. При этом с помощью реле времени, соединенного с секундомером, удается установить точно время действия (0,5; 1; 1,5 или 2,5 с). После выключения мгновенного источника разность температур  $\Delta t$  начинает увеличиваться и в какой-то момент времени  $\tau_{\max}$  достигает самого большого значения  $\Delta t_{\max}$ .

Преимущество метода состоит в его быстроте и значительной простоте установки. К недостаткам можно отнести наличие теплофизических характеристик эталона и большую мощность мгновенного источника. Нужны достаточно «широкие» размеры плоскостей нагревателя с целью исключения внешнего теплового эффекта.

Кратковременный тепловой импульс [73, 98] между двух полуограниченных тел (параллелепипедов, стержней) позволяет также определять теплопроводность материалов по измерениям времени  $\tau$  и максимального изменения значения температуры в точке, находящейся на расстоянии от теплового источника. Однако описанные способы являются не абсолютными, а относительными, так как определение ТФХ материалов производится с помощью эталонного образца.

Среди методов импульсного типа получил распространение метод нагрева лазерным импульсным излучением плоских образцов-дисков. Информация о характерном времени изменения температуры стороны, противоположной нагреваемой, дает возможность определять теплопроводность. В целом это один из самых удобных и популярных методов исследования, но требуется дорогая и сложная аппаратура (импульсный оптический квантовый генератор, осциллограф, калориметр, газовый лазер).

Другая группа методов импульсного нагрева имеет дело с плоскими или цилиндрическими нагревателями, внедряемыми в тело образца [40]. При хорошем тепловом контакте зонда с исследуемой средой этот способ позволяет достаточно точно определить количество теплоты, вводимой в материал и определять ТФС материала.

Метод двух временных интервалов получил достаточно широкое распространение как один из существующих скоростных методов для определения температуропроводности веществ. В начальный момент времени, принимаемый за начало отсчета, свободная поверхность образца мгновенно нагревается до температуры  $t_n$ , которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса. При этих условиях требуется найти зависимость температуры  $t$  от времени  $\tau$  в точке 0 в предположении, что начальная температура (при  $x = \infty$ ) поддерживается равной нулю. Далее решаются совместно дифференциальные уравнения теплопроводности для образца и теплоприемника с учетом контактных условий в месте соприкосновения плоскостей.

*Преимущества метода:* 1) метод относится к скоростным методам; 2) окончательная формула для обработки результатов опыта имеет простой вид; 3) легко изготовить образец (теплоприемник), т.к. он имеет цилиндрическую форму; 4) в результате численных расчетов по теории построены удобные номограммы и таблицы.

*Недостатки метода:* 1) метод не абсолютный и требует предварительного определения теплопроводности и температуропроводности материала теплоприемника; 2) необходимо поддерживать постоянную температуру на одной стороне образца; 3) для определения температуропроводности, необходимо иметь боковую теплоизоляцию.

При определении температуропроводности всех импульсных методов основным источником погрешностей являются потери теплоты из-за теплообмена между образцом и окружающей средой и влияние конечной длительности импульса. Теплообмен облученного образца с окружающей средой приводит к потерям теплоты за время распространения импульса в образце. Это влечет за собой уменьшение времени  $\tau$  и, следовательно, завышение значения температуропроводности.

Борьба с тепловыми потерями ведется самыми разнообразными способами. С одной стороны, выбираются образцы с малым отношением толщины к диаметру, с другой, для устранения потерь теплоты конвекцией, радиацией и теплопроводностью образцы помещают в вакуум, экранируют и окружают тепловой изоляцией. Однако такие меры не позволяют избавиться от тепловых потерь, да и для определения температуропроводности необходимо производить корректировку методом последовательных приближений.

Необходимо также учитывать поправки на эффект конечной длительности импульса, особенно если в эксперименте время импульса соизмеримо с характеристическим временем. В этом случае подъем температуры на поверхности образца будет несколько замедлен, что приводит к заниженным значениям температуропроводности.

Несмотря на глубокую аналитическую и практическую разработку импульсных методов, существуют некоторые неучтенные факторы, способные вызвать систематические погрешности при измерениях. Так не учитывается влияние инерционных измерительных схем. При исследовании теплоизоляторов использование контактных поверхностных термопар неизбежно приводит к тепловым контактным сопротивлениям между образцом и температурным датчиком. В результате значение максимальной температуры образца будет заниженным, а инерционность термопары резко возрастет.

### 1.2.5 Методы температурных волн

Особого внимания заслуживают методы измерений, основанные на использовании периодического нагрева температурными волнами. Изучение распространения плоских и квазиплоских (цилиндрических, сферических) температурных волн позволило использовать данное явление для определения теплофизических характеристик твердых материалов. Задачи такого типа решены А.В. Лыковым [46, 48].

Метод режима температурных волн находит применение при определении теплопроводности  $a$  теплоизоляционных материалов в варианте радиального нагрева цилиндрического образца. Метод радиального нагрева основан на зависимости между значениями максимальных амплитуд гармонических колебаний температуры в двух фиксированных точках цилиндрического образца и теплопроводности исследуемого материала, выраженной отношением

$$a = (\omega \cdot r^2) / Pd,$$

где  $\omega$  — угловая частота колебаний температуры;  $r$  — радиальное расстояние;  $Pd$  — критерий, зависящая от отношения  $A_r/A_0$ ;  $A_r$  — максимальная амплитуда температуры на расстоянии  $r$  от оси по радиусу образца;  $A_0$  — максимальная амплитуда температуры на оси образца.

Образец цилиндрической формы с термопарами в его продольных отверстиях по оси и ближе к поверхности помещается в электрическую печь, нагреватель которой включается и выключается через равные промежутки времени (с помощью вариатора). После установления регулярного режима определяются амплитуды колебаний  $A_r$  и  $A_0$ , по отношению которых с использованием заранее известной теоретической зависимости  $A_r/A_0 = f(Pd)$  определяется значение числа  $Pd$ , а затем рассчитывается  $a$ . В точных измерениях для определения амплитуд первой гармоники используется гармонический анализ [68].

Метод использовался для исследований фторопласта, эбонита и других материалов. Информация об изменении фазы и амплитуды температурных волн вдоль образца дает возможность получать сведения о температуропроводности материала, а погрешность измерений в зависимости от конструкции опытных образцов оценивается в 5 %.

Известен метод комплексного определения тепловых свойств веществ. Метод регулярного теплового режима третьего рода или температурных волн может быть комплексным и динамическим. Исследования в этом случае должны проводиться в процессе монотонного изменения средней температуры образца во времени.

Однако при экспериментальном осуществлении периодического закона наложение монотонно возрастающей составляющей температуры на синусоиду требует большого количества времени. Этого можно избежать, если использовать два одинаковых образца с плоскими нагревателями, которые помещаются в печь. Один образец с нагревателем является основным, второй — вспомогательным. В основном нагревателе ток изменяется по закону

$$I = I_{\text{макс}} [\sin(0,5\omega t)],$$

где  $I$ ,  $I_{\text{макс}}$  — соответственно мгновенное и амплитудное значение тока.

Во вспомогательном (компенсационном) нагревателе мощность, выделяемая единицей поверхности, должна быть равна средней по времени мощности основного нагревателя, т.е.

$$W = 0,5I_{\text{макс}}^2 RF^{-1}$$

В обоих образцах в точках внутри образцов, расположенных соответственно на одинаковых расстояниях от нагревателей, помещаются спаи дифференциальных термопар. Средняя монотонно изменяющаяся температура образца измеряется термопарой, холодный спай которой помещается в сосуд с тающим льдом. Запись термо-ЭДС термопар осуществляется электронным быстродействующим самопишущим потенциометром.

Температуропроводность определяется по формуле

$$a = \frac{0,5\omega l}{\left( \ln \frac{t_{A,\text{МАКС}}}{t_{B,\text{МАКС}}} \right)},$$

где  $\omega$  — циклическая частота колебаний;  $t_{A,\text{МАКС}}$ ,  $t_{B,\text{МАКС}}$  — соответственно амплитудные (максимальные) периодические составляющие температуры, регистрируемые термоприемниками;  $l$  — расстояние между приемниками.

Теплопроводность определяется из выражения

$$\lambda = \frac{0,25}{F} \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \left[ -\omega C + \sqrt{2W_{\text{МАКС}}^2 t_{\text{Н,МАКС}}^{-2} - (\omega C)^2} \right],$$

где  $F$  — односторонняя поверхность нагревателя;  $C$  — полная теплоемкость нагревателя;  $W_{\text{МАКС}}$  — амплитудное значение периодической составляющей мощности нагревателя;  $t_{\text{Н,МАКС}}$  — амплитудное значение температуры нагревателя (вычисляется после подсчета температуропроводности, если известны расстояния датчиков температуры от нагревателя).

Основным недостатком данного способа является малая точность измерения температуропроводности и теплопроводности, обусловленная динамическими погрешностями из-за влияния значения теплоемкости и периодической составляющей мощности нагревателя, амплитудных (максимальных) периодических составляющих температур, потерями теплоты за счет теплообмена с окружающей средой, контактным сопротивлением между образцами и нагревателем. Кроме того, требуется установка дифференциальных термопар внутрь исследуемого образца, что нарушает его целостность.

В экспериментах с нагревом торцевой поверхности образца, путем электронной бомбардировки, температуропроводность  $a$  определяется по сдвигу фаз, между колебаниями анодного тока и колебаниями температуры на обратной поверхности тонкого образца. Все испытания при температурных волнах проводятся на установке, в которую входит нагреватель, возбуждающий периодические тепловые воздействия на образец той или иной формы. Регулировка мощности осуществляется с помощью автоматических устройств. Нагреватели должны иметь малую инерционность и создавать достаточный тепловой поток. Существенным в проведении экспериментов является исключение лучистой составляющей или учет ее с помощью поправочных коэффициентов.

### 1.2.6 Комплексные методы

Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента на одной установке и на одном образце несколько теплофизических характеристик в широком интервале температур: теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость материала. Комплексные методы в большинстве случаев основываются на теории начальной и основной стадий процессов нестационарной теплопроводности. Принципы и реализация ряда применяемых комплексных методов рассматриваются в [5, 32, 39, 68, 104, 107].

Ряд нестационарных методов комплексного определения теплофизических характеристик основан на решении задач теплопроводности при действии источника (зонда) постоянной мощности (плоского, цилиндрического, сферического) в неограниченной среде.

*Метод плоского источника* постоянной мощности основан на закономерности развития одномерного температурного поля в полуограниченном теле при нагреве его постоянным тепловым потоком. На основе метода плоского источника постоянной мощности разработан прибор для комплексных исследований ТФС сухих и влажных теплоизоляционных материалов с  $\lambda = 0,03 \dots 4$  Вт/(м·К) в квазистационарном режиме.

Закономерности развития нестационарных температурных полей, создаваемых действием мгновенных точечных, линейных или плоских источников теплоты в неограниченном теле, положены в основу создания ряда импульсных методов, комплексного определения теплофизических характеристик различных материалов.

*Импульсный метод линейного источника* теплоты основан на решении двухмерного уравнения теплопроводности, для неограниченного тела, при действии в нем в течение короткого времени  $\tau_0$  линейного источника теплоты. При реализации метода в исследуемом образце размещают линейный источник теплоты (проволока диаметром 0,05...0,1 мм с малым температурным коэффициентом сопротивления), а на расстоянии  $r_0$  от него — дифференциальную термопару. Начальная температура образца должна быть равна температуре окружающей среды  $t_0$ . Электрическая схема прибора включает реле времени, с помощью которого обеспечивается заданная длительность импульса  $\tau_0$ , фотоэлектрический самопишущий прибор для регистрации зависимости  $\Delta t_{\max} = f(\tau)$  и промежуточное пусковое реле, синхронизирующее работу реле времени с подачей мощности на источник тепла [86].

Комплексные методы, основанные на автоматических режимах, могут быть отнесены к зондовым методам. Теория зондовых методов основана на анализе автоматических задач теплопроводности. На решении этих задач базируются экспериментальные методы, позволяющие учесть влияние зависимости теплофизических характеристик от температуры.

Сравнительные методы с применением «неограниченного эталона» используются для комплексного определения теплофизических характеристик материалов в начальной стадии теплообмена. Эти методы основаны на уравнениях, описывающих температурные поля плотно соприкасающихся между собой двух сред: исследуемого материала и эталона с известными коэффициентами  $a_2$  и  $\lambda_2$  при наличии источника теплоты.

Особое место в определении ТФХ веществ занимают тепловые методы неразрушающего контроля и диагностики (ТМНК), также основанные на мгновенном или импульсном тепловом воздействии на исследуемый образец. Методы неразрушающего контроля позволяют определять качество исследуемых материалов и изделий, обладают высокой оперативностью и широкими функциональными возможностями [32, 38, 39, 50, 62...65, 69, 92, 104, 110].

В ТМНК [102, 103, 110] на поверхности исследуемого тела, теплоизолированного от окружающей среды, помещается линейный импульсный источник теплоты, а на заданном определенном расстоянии от него — рабочие концы двух термопреобразователей (термопар). Затем от источника теплоты подается тепловой импульс заданной мощности и фиксируется такой момент времени  $\tau_1$ , при котором соотношение между избыточными температурами, достигнет определенного заранее заданного значения:

$$T(x_1, \tau_1) = n \cdot T(x_2, \tau_2),$$

где  $T(x_1, \tau_1)$  и  $T(x_2, \tau_2)$  — соответственно температура в двух разноотстоящих от линейного источника теплоты точках поверхности исследуемого тела  $x_1$  и  $x_2$  в момент времени  $\tau_1$ ;  $n$  — постоянный коэффициент ( $n > 1$ ).

Предлагаемый метод позволяет определить комплекс ТФХ исследуемого тела в течение одного опыта без нарушения структуры материала.

Определение ТФС материалов производят и при бесконтактном тепловом воздействии от подвижного источника теплоты. В основу теории большинства тепловых методов бесконтактного неразрушающего контроля ТФС твердых материалов положено явление собственного теплового излучения с поверхности исследуемых материалов и изделий, пропорционального четвертой степени их абсолютной температуры. Нагрев поверхности твердых материалов производится подвижным непрерывным точечным источником теплоты с регистрацией температуры нагреваемой поверхности одним или несколькими термоприемниками, движущимися вслед за источником теплоты с той же скоростью.

Однако, при проведении теплофизического эксперимента в реальных условиях в процессе бесконтактного теплового воздействия на поверхность исследуемого объекта от подвижного источника теплоты из-за невозможности теплового изолирования поверхности с нее в окружающую среду происходят тепловые потери, оказывающие существенное влияние на температурное поле исследуемых объектов при указанном виде теплового воздействия. Эти тепловые потери вызваны конвективным и лучистым теплообменом поверхности исследуемого тела с окружающей средой. Кроме того, такие параметры как



коэффициент излучения тела  $\varepsilon$ , коэффициенты конвективного  $\alpha_k$  и лучистого  $\alpha_l$  теплообмена, зависят также и от температуры.

Тепловые потери обусловлены также вследствие неполного поглощения поверхностью исследуемого объекта тепловой энергии источника теплоты. Кроме того, часть теплоты поглощается окружающей средой при прохождении через нее излучения от источника теплоты до объекта исследования в результате молекулярного поглощения и рассеяния на частицах пыли и воды, содержащихся в окружающей среде (атмосфере).

Комплексные методы также используются в методах регулярного режима, температурных волн, а также при сочетании квазистационарных и стационарных тепловых режимов.

### **1.2.7 Анализ методов теплообмена и расчета ТФС материалов**

Анализ предшествующих исследований экспериментального определения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости веществ и материалов показывает, что в большинстве методов теплообмена, а также проведения экспериментов, требуется создание специальных условий. Специальные или подготовительные работы включают в себя: установку термопар внутри исследуемого материала или образца; поддержание постоянной температуры среды, теплового потока или определенных коэффициентов теплообмена; устройство торцевой изоляции; учет поправок на нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен; устройство охранных нагревателей.

Эти требования существенно ограничивают возможности использования серийных приборов для исследований строительных, теплоизоляционных и других материалов (минералов, горных пород), а также ограждений зданий и сооружений. Образцы гетерогенных, композиционных материалов не могут быть сколь угодно малыми. Строительные и теплоизоляционные материалы используемые для ограждения здания в строительстве имеют свои особенности, как по структуре, так и по форме.

Следовательно, оптимальным методом для экспериментального определения ТФС: теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости строительных и теплоизоляционных материалов и ограждений зданий является метод, исключаяющий влияние внешних условий на процесс исследования и основанный на измерениях температур и тепловых потоков на поверхности.

Преимущества и недостатки предшествующих исследований экспериментального определения теплопроводности, теплоемкости, температуропроводности материалов и изделий приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 Преимущества и недостатки методов экспериментального определения ТФС веществ и материалов

Метод исследования	Преимущества метода	Недостатки метода
1	2	3
1. Регулярный тепловой режим: $a$ —калориметр, $\lambda$ —калориметр, калориметр двух и более точек, бикалориметр, микрокалориметр; погрешность до 8 %	абсолютный, непродолжительное время опыта, формулы для обработки имеют простой вид	необходима капельная среда, постоянная температура среды, большой коэффициент теплоотдачи
2. Квазистационарный тепловой режим; погрешность измерений 5...8 %	простые формулы; быстрая проведения опыта	торцевая теплоизоляция; замер температуры на поверхности нагревателя
3. Монотонный тепловой режим; Погрешность измерений 5...8 %	широкий диапазон измерения температур	поправки: нелинейность, контактное сопротивление, боковой теплообмен
4. Теплового импульса или мгновенного источника	скоростной; легко изготовить образец (теплоприемник)	относительный; постоянство $T$ на образце; потери теплоты из-за теплообмена образца и средой; влияние конечной длительности импульса
5. Комплексные методы плоского и линейного источника	комплексный метод определения ТФС, простые установки	постоянный тепловой поток, импульс температур, поправки
6. Тепловые методы неразрушающего контроля	неразрушающий контроль	тепловые потери излучением и конвекцией
7. Метод температурных волн	комплексный метод	малая точность $a$ и $\lambda$ , термопары внутри тела
8. Предлагаемый метод определения ТФС материалов по температурным и тепловым измерениям на поверхности пластины, ограждения здания	абсолютный комплексный метод определения ТФС, в структуру не входят коэффициент теплоотдачи, степень черноты и др.	циклический естественный подвод теплоты к наружному ограждению здания в течение суток

## 1.3 Обзор методов измерений звукофизических параметров

### 1.3.1 Измерительная аппаратура и оборудование

Для исследования звукофизических свойств (ЗФС) разработаны теоретические основы [4, 13, 26], измерительная аппаратура и оборудование [2].

Скорость звука, частота колебаний акустических волн, длина звуковой волны, звукопроводность, звукопоглощение, звукоизоляция и другие звукофизические свойства отдельных строительных, теплоизоляционных, облицовочных, светопрозрачных материалов, металлов, ограждений зданий и помещений приведены в справочной и технической литературе [26, 31, 82, 83].

При акустических измерениях используют аппаратуру общего применения, а также специальную измерительную аппаратуру. К аппаратуре общего применения относят: тональные генераторы, электронные вольтметры, измерители нелинейных искажений, измерители уровня, осциллографы, анализаторы гармоник, записывающие обычные и цифровые устройства, измерительные усилители и т. п.

К специальной измерительной аппаратуре относят: тональные и шумовые генераторы, измерители звукового давления, акустический зонд, шумомеры, октавные фильтры, быстродействующие регистраторы уровня, реверберометры, спектральные анализаторы, анализаторы амплитудных распределений, пистонифоны и т.п.

Измерители звукового давления состоят из измерительного микрофона с электронным вольтметром, проградуированным в децибелах или паскалях относительно порога слышимости или нулевого уровня интенсивности звука (или шёпот, при  $\nu = 1000$  Гц) и принята  $J_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Измерители звукового давления работают во временном диапазоне импульсных звуков, уровней звуков речи и длительного значения. Акустический зонд измеряет звуковое давление в небольшом замкнутом объеме или около поверхности тела.

Шумомеры измеряют звуковое давление по уровню громкости с частотной характеристикой 40 фон, 70 фон, 85 фон и выше. Шумомеры обычно снабжаются октавными фильтрами с компенсацией их затухания. Шумомеры предназначены для измерений импульсных шумов, речи и среднего давления. Регистраторы уровня подключаются к измерителям звукового давления для автоматического записывания частотных характеристик.

Реверберометр измеряет время реверберации в помещении или в реверберационной камере. Реверберометр интегрального типа интегрирует уровни во времени с момента включения источника звука до достижения заданного порогового уровня.

Для анализа речи, музыки и шумов используют спектральные анализаторы в комплекте с полосовыми фильтрами и измерителями звукового давления. Анализатор амплитудных распределений уровня имеют комплект пороговых устройств, для получения требуемой точности анализа. Пистонфоны используют для градуировки микрофонов.

Комплект универсальной измерительной акустической аппаратуры включает перечисленные приборы, вспомогательные и другие приспособления, который позволяет измерять частотные, амплитудные и временные характеристики, проводить анализ акустических сигналов и шумов и записывать временные процессы в помещениях.

### **1.3.2 Методы измерения звукофизических параметров**

Измерение звукофизических характеристик проводят в заглушенной камере или свободном поле, в резонансной или антирезонансной трубе, а для твердых тел и перегородок чаще всего в универсальной реверберационной камере. Оборудование для реверберационной камеры включает генератор тонального или белого шума, третьоктавный фильтр, мощный усилитель, громкоговорители, измерительные микрофоны и милливольтметры. Объем камеры должен быть не менее  $50 \text{ м}^3$ .

Исследуемую перегородку или образец твердого материала плотно монтируют в толстую стену без щелей и с виброизоляцией от других стен реверберационной камеры. Размеры перегородок или материалов берут по возможности натуральной величины, но не менее  $10 \text{ м}^2$ , а минимальный размер стороны не менее  $2,5 \text{ м}^2$ . От генератора, через усилитель, включают громкоговорители, установленные в камере до перегородки.

Микрофоны измеряют уровни звукового давления перед перегородкой и после неё. Измерительные точки должны находиться на расстоянии не менее  $1 \text{ м}$  от ограждающих поверхностей камеры. Измерения ведут в октавных или третьоктавных полосах частот в диапазоне  $150 \dots 3150 \text{ Гц}$ . Уровни измеряют шумомером с полосовыми фильтрами, а средний уровень для каждой полосы определяется как среднее арифметическое из значений, измеренных во всех точках реверберационной камеры.

Эффективность звукоизоляции ограждений оценивается индексом изоляции воздушного шума и измеряется в децибелах дБ (dB) [X7]. Для расчёта эффективности звукоизоляции используют значения звукопроводности, частоты звука, поверхностной плотности [8]. Звукопоглощение оценивают с помощью безразмерного коэффициента звукопоглощения в диапазоне частот  $125 \dots 6000 \text{ Гц}$  [5] и этот коэффициент может принимать значения от 0 до 1.

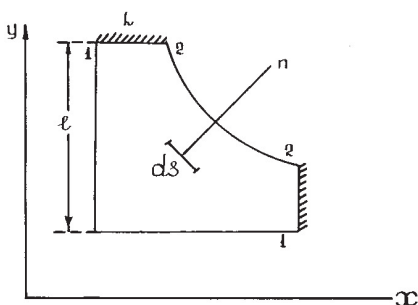
## 1.4 Электротепловая аналогия

В настоящее время повышение энергоэффективности ограждений зданий и сооружений часто выполняется за счет пустотелости кирпича и облицовочных материалов воздушными прослойками или пустотами сложной формы. Известно, что распространение теплоты и электричества в теле описывается совершенно аналогичными по форме дифференциальными уравнениями, в силу чего они решаются с одинаковой степенью трудности.

Однако экспериментальное определение поля электрического потенциала и распространения электричества гораздо проще. Поэтому и возникает вопрос об использовании электротепловой аналогии, для чего из электропроводной бумаги вырезают контуры тела сложной конфигурации, где устанавливают медные шины с подключением электрического потенциала.

Электротепловая аналогия используется для определения тепловых потоков в телах сложной формы.

Допустим, имеем тело — угол здания сечением сложной формы в виде овальной трапеции, приведенной на рисунке:



$1-1$  и  $2-2$  – контуры тела сложной конфигурации, где установлены медные шины с электрическим потенциалом;

$L$  – глубина тела

Распространение теплоты в декартовой системе координат описывается дифференциальным уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad \text{или} \quad \frac{\ell^2}{(T_1 - T_2)} \cdot \left[ \frac{\partial^2 (T - T_2)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (T - T_2)}{\partial y^2} \right] = 0.$$

Введем обозначения:  $X = \frac{x}{\ell}$ ;  $Y = \frac{y}{\ell}$ ;  $\Theta = \frac{T - T_2}{T_1 - T_2}$ ; (а)

Тогда:  $\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} = 0.$  (б)

Количество теплоты, проходящей через элементарную площадку:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \cdot ds \cdot L, \text{ или } dQ = -\lambda \frac{\partial(T - T_2)}{\partial n} \cdot ds \cdot L \cdot \frac{\ell}{\ell} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_2}.$$

Если обозначить:  $N = \frac{n}{\ell}$ ,  $S = \frac{s}{\ell}$ , то:  $dQ = -\frac{\partial \Theta}{\partial N} dS \cdot \lambda L (T_1 - T_2)$ ,

откуда:  $Q = \left[ \int -\frac{\partial \Theta}{\partial N} dS \right] \cdot \lambda L (T_1 - T_2) = \xi_T \cdot \lambda L (T_1 - T_2)$ ,

$$\xi_T = \left[ \int -\frac{\partial \Theta}{\partial N} dS \right]. \quad (\text{в})$$

Распространение электричества в двух измерениях также описывается дифференциальным уравнением Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0,$$

а, количество электричества, проходящего через элементарную площадь:

$$dJ = -\mathcal{E} \frac{\partial U}{\partial n} dS \cdot L.$$

Действуя точно таким же образом, можно получить:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = 0; \quad J = \xi_{\mathcal{E}} \cdot \mathcal{E} L (U_1 - U_2); \quad (\text{г})$$

Соответственно:  $\xi_{\mathcal{E}} = \left[ \int -\frac{\partial U}{\partial N} dS \right]; \quad U = \frac{U - U_2}{U_1 - U_2}.$  (д)

Так как предполагается абсолютное геометрическое подобие тепловой и электрической систем координат ( $N_T = N_{\mathcal{E}}$ ;  $S_T = S_{\mathcal{E}}$ ;  $X_T = X_{\mathcal{E}}$ ;  $Y_T = Y_{\mathcal{E}}$ ) и если  $Q = U$ , то из выражений (в) и (д) следует:  $\xi_T = \xi_{\mathcal{E}}$ .

Само равенство теплового и электрических потенциалов в их безразмерной форме вытекает из аналогии дифференциальных уравнений (б) и (г), для которых общие решения должны описываться функциями одного и того же вида:

$$\Theta = f(X, Y, C, D); \quad U = f(X, Y, E, M).$$

Согласно (а) и (б) для тепловой схемы и контуров тела, обозначенных номером 1 и 2, имеем:

$$\Theta_1 = f(X_1, Y_1, C, D) = 1, \quad \Theta_2 = f(X_2, Y_2, C, D) = 0.$$

То же для электрической схемы с учетом (г):

$$U_1 = f(X_1; Y_1; E; M) = 1, \quad U_2 = f(X_2; Y_2; E; M) = 0.$$

Все эти уравнения позволяют доказать равенство констант интегрирования ( $C = E; D = M$ ), а следовательно, и равенство безразмерных потенциалов  $\Theta = U$ . Таким образом  $\xi_T = \xi_{\vartheta} = \xi$ .

Для технического выполнения метода электротепловой аналогии и определения количества теплоты, проходящего через тело сложной конфигурации, методом электротепловой аналогии требуется следующее.

1. Из электропроводной бумаги вырезают модель-сечение, подобное исследуемому тепловому оригиналу (например, как на рисунке), а также бумага — форма, в виде прямоугольника. Геометрическая конфигурация электрической модели должна быть выполнена в строгом соответствии с геометрической конфигурацией образца без каких-либо излишеств электропроводной бумаги, ибо электропроводность и толщина бумаги может в какой-то мере зависеть от выпущенной партии и положения ее в рулоне.

2. По контурам электропроводной бумаги, для модели и прямоугольника, равномерно и достаточно плотно (для обеспечения контакта) устанавливают медные шины с электрическим потенциалом.

3. Вначале определяется фактор формы  $\xi_{пл}$  электропроводной бумаги прямоугольной формы, путем измерения линейкой ее геометрических параметров (размеров) — высоты  $h$  и ширины  $\delta$ . Фактор формы определяется как отношение  $\xi_{пл} = h/\delta$ .

4. Замеряют показание потенциала  $U_1$  при постоянном значении напряжения в системе: модель и прямоугольник.

5. Замеряют вначале значения тока  $J$ , напряжения  $U$  на прямоугольнике

и вычисляют  $(\partial L_{\vartheta}) = \frac{J_{пл}}{\xi_{пл}(U_1 - U_{2пл})}$ .

6. Замеряют значения тока  $J$ , напряжения  $U$  на модели и вычисляют

$$\xi_{мод} = \frac{J_{мод}}{(\partial L_{\vartheta}) \cdot (U_1 - U_{2мод})}$$

7. Количество передаваемой теплоты в теле-оригинале ( $\tau$ ) от контура  $T_1$  до контура  $T_2$  находится простым расчетом:  $Q_T = \xi_{мод} \cdot \lambda_T \cdot L_T (T_1 - T_2)$ , (Вт).

Как и все методы определения теплофизических и звукофизических свойств материалов и изделий, электротепловая аналогия имеет свои преимущества и недостатки. Электротепловая аналогия подтолкнула авторов на разработку тепловозвучковой аналогии.

## 1.5 Выводы по главе 1

Результаты энергоаудита объектов строительства и ЖКХ показывают совсем высокий уровень тепловой и звуковой защиты ограждений зданий различного назначения. Энергоэффективность зданий и сооружений требует создания и реализации новых, точных, надежных, простых и более эффективных методов определения теплофизических и звукофизических свойств (ТЗФС) материалов, изделий, ограждений зданий и сооружений, а также и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий.

Теплофизические свойства строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий, а также светопрозрачных ограждений существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также на работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой и электрической энергии. Поэтому актуальной является задача снижения уровня эксплуатационного энергопотребления.

Кроме того, тепло-звукофизические свойства строительных, теплоизоляционных материалов и изделий, светопрозрачных ограждений существенно влияют на эргономическое и экологическое состояние человека пребывающего в воздушном пространстве зданий различного назначения, а также на состояние его здоровья. Анализ состояния вопроса и предшествующие исследования по экспериментальному определению ТФС и ЗФС материалов позволяют сделать следующие выводы.

1. Для определения теплофизических свойств материалов и изделий применяют стационарные, нестационарные и комплексные методы, основанные на теории теплопроводности при стационарном или нестационарном тепловом режиме. Кроме того, эти методы могут быть абсолютными и относительными. Экспериментальное определение ТФС стационарными методами, сопровождается рядом побочных явлений: утечкой теплоты через торцы, конвекцией, излучением, скачками температуры на границе тела, ограждения и воздуха. В процессе нагрева исследуемых влажных материалов ограждений зданий происходит перераспределение влаги, что искажает опытные данные.

В большинстве методов определения ТФС материалов и изделий установка датчиков температур проводится внутри тела, что связано с рядом трудностей, так как расположение термопар в центральной части нарушает целостность образца. Если на границе тела действует сложный (лучистый или суммарный) теплообмен, то задачи такого рода значительно усложняются как теоретически, так и экспериментально.



В нестационарных методах исследования теплофизических свойств затрачивается меньше времени и тепловой энергии для проведения эксперимента. Комплексные методы позволяют определять одновременно из одного эксперимента несколько теплофизических свойств. В абсолютных методах определение параметров осуществляется непосредственным измерением, а в относительных методах определяемые параметры зависят от постоянной прибора и определяются путем тарировки по эталонному образцу.

Поэтому наиболее приемлемым способом определения ТФС строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий должен быть неразрушающий метод, основанный на измерениях температур и тепловых потоков на поверхности, без нарушения их целостности.

2. Для определения звукофизических свойств, строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий, ограждений зданий и сооружений применяют дорогостоящую аппаратуру и оборудование. Методы измерения основных характеристик аппаратуры и помещений, а также ЗФС материалов и изделий основаны на сложных эмпирических зависимостях, имеющих значительные погрешности и малую точность измерений.

3. Электротепловая аналогия используется для определения тепловых потоков в телах сложной формы. Для технического выполнения метода электротепловой аналогии и определения количества теплоты, проходящего через тело сложной конфигурации, из электропроводной бумаги вырезают модель-сечение, подобное исследуемому тепловому оригиналу. Геометрическая конфигурация электрической модели должна быть выполнена в строгом соответствии с геометрической конфигурацией образца без каких-либо излишеств электропроводной бумаги.

4. Установлено, что перспективным направлением в развитии методов определения ТЗФС является создание неразрушающих методов измерения и контроля. Наиболее приемлемым способом определения ТЗФС материалов является метод, исключаяющий влияние внешних условий на процесс исследования и основанный на тепловых и температурных измерениях, без внедрения вглубь материала и нарушения целостности.

5. Монография посвящена разработке нового энергоэффективного комплексного способа определения теплофизических и звукофизических свойств (ТЗФС) строительных, теплоизоляционных, облицовочных и других твердых материалов и изделий, ограждений зданий и сооружений, методом тепло-звуковой аналогии и неразрушающего контроля.

### 2.1 Актуальность исследования звукофизических свойств

Комфортные условия для человека в жилых и общественных зданиях и помещениях достигаются путём обеспечения температурно-влажностного режима, а также состоянием шума и шумоизоляции. Для этого используют различные строительные, тепло- и звукоизолирующие материалы. Кроме того устанавливают соответствующее остекление и применяют облицовочные материалы. Оценка эффективности ограждений зданий и помещений зависит от знания теплофизических (ТФС) и звукофизических (ЗФС) свойств материалов и изделий. Для исследования ТФС строительных и теплоизоляционных материалов, а также ограждений зданий авторами разработаны комплексные методы неразрушающего контроля [32, 43, 62...65, 90...96].

Для исследования ЗФС разработаны теоретические основы [26], измерительная аппаратура и оборудование [2]. Звукофизические свойства отдельных материалов ограждений зданий и помещений приведены в справочной и технической литературе [26].

В реальных условиях зданий и сооружений чаще всего встречаются ограждения, состоящие из «пирога» соприкасающихся отдельных материалов (в том числе и современных), технических данных по которым нет в справочной и технической литературе. Возникает необходимость определения именно эквивалентных (объединённых) звукофизических свойств ограждений зданий и помещений и это возможно решить только при разработке новых энергоэффективных методов неразрушающего контроля, позволяющих комплексно определять как теплофизические, так и звукофизические свойства материалов, перегородок и ограждений.

Как показывает опыт эксплуатации ограждения зданий и помещений в большинстве случаев обеспечивают необходимое звукопоглощение и звукоизоляцию, а вот остекление не в должной степени. В частности, в современных зданиях используют окна различных конструкций в пластиковом, деревянном или алюминиевом профиле, а основную роль в звукопоглощении и звукоизоляции выполняет стеклопакет (обычно одно- или двухкамерный). Строительные, теплоизоляционные и облицовочные материалы и изделия ограждений зданий, сооружений и помещений, находящихся в воздушном пространстве, требует разработки неразрушающих методов контроля звукофизических свойств (ЗФС), и поэтому в приведенной работе подраздел общей акустики обозначено как строительная акустика.

## 2.2. Основные характеристики, определения и понятия

Пространство или вещество, в котором распространяются звуковые или акустические волны, называют звуковым полем. Фронт волны — поверхность определённых смежных точек среды с одинаковой фазой колебаний частиц среды. Фронт волны перпендикулярен направлению распространения звуковых волн (звуковых лучей) и поэтому в практических случаях обычно рассматривают три вида фронта волны: плоская, цилиндрическая и шаровая (сферическая) волна.

Скорость звука акустическая —  $C_A$  (м/с) или скорость распространения звуковой волны зависит от плотности, температуры и давления среды. В воздухе скорость звука  $C_A = 20\sqrt{T}$ . Соответственно при  $T = 273$  К,  $C_A = 330$  м/с, а при  $T = 293$  К,  $C_A = 343$  м/с. При изменении (увеличении) температуры воздуха на  $50$  °С скорость звука увеличивается на 10%. При уменьшении барометрического давления скорость звука уменьшается, так на высоте 10 км скорость звука составляет 90% от скорости на уровне моря.

Скорость звука для водяного пара составляет 405 м/с, воды пресной — 1430 м/с, воды соленой (3,5%-ной) — 1500 м/с. Скорость звука в строительных, теплоизоляционных материалах, металлах и изделий из них зависит от плотности, температуры, удельного акустического сопротивления и пространства (в неограниченной среде, в стержне, в пластине).

Частота колебаний акустических волн  $f$  (1/с) показывает, сколько колебаний совершается за одну секунду и называется Гц. Частоты акустических колебаний в пределах от 20 до 20000 Гц называют звуковые, ниже 20 Гц — инфразвук, выше 20000 Гц — ультразвук, а более  $10^{10}$  Гц — гиперзвук. Ультразвук в воздухе поглощается в тысячу раз интенсивнее, чем в воде (в воде — гидроакустика). Ультразвук используют в технических процессах: получение эмульсий, удаление плёнок окислов, обезжиривание поверхностей, размельчение зерен, ускорение теплообмена и химических реакций. Ухо человека способно уверенно слышать на частоте  $700 \div 6000$  Гц.

Длина звуковой волны  $\Lambda$  (м) — расстояние между соседними фронтами волн с одинаковой фазой колебаний. Скорость распространения звуковой волны  $C_A$  (м/с), и длина звуковой волны  $\Lambda$  (м) зависят от свойств среды, плотности среды  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) и связаны зависимостью:  $\Lambda = C_A / f$ . Например, для воздуха при температуре  $20$  °С и давлении 0,1 МПа (760 мм.рт.ст.) скорость звука  $C_A = 343$  м/с, тогда при частоте звуковой волны  $f = 500$  Гц, длина звуковой волны соответственно будет равна:  $\Lambda = 343/500 = 0,68$  м; при частоте звука  $f = 1000$  Гц:  $\Lambda = 0,34$  м; при  $f = 5000$  Гц:  $\Lambda = 0,07$  м.

Звуковое поле в газах, жидкостях, воздухе и твердых телах характеризуется энергетическими и линейными параметрами. Интенсивность звука  $J$  или сила звука — количество энергии в джоулях (Дж), проходящее в секунду (с) через единицу площади ( $\text{м}^2$ ), перпендикулярной к направлению распространения волны и имеет размерность —  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Звуковое давление  $P$  — это сила в ньютонах (Н), действующая на единицу поверхности ( $\text{м}^2$ ) и имеющая размерность —  $\text{Н}/\text{м}^2$ . Эта единица называется Паскаль (Па), а звуковое давление  $P = 1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 1 \text{ Па} = 1 \text{ кгс}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$ . Звуковое давление в паскалях в 1000 раз меньше атмосферного давления и не превышает 20...100 Па.

Плотность акустической энергии  $\mathcal{E}$  — количество звуковой энергии (Дж), находящейся в единице объёма ( $\text{м}^3$ ) и имеет размерность —  $\text{Дж}/\text{м}^3$ .

Скорость колебаний звуковой волны  $v$  — скорость движения частиц под действием проходящей звуковой волны и имеет размерность —  $\text{м}/\text{с}$ . Скорость движения звуковой волны или скорость звука  $C_A$  — это постоянная для данной среды и условий распространения, а скорость колебаний  $v$  ( $\text{м}/\text{с}$ ) — варьирует (var). Скорость колебаний  $v$  считается положительной, если движение частиц среды идёт в направлении распространения волны и отрицательной — в обратном направлении.

Удельное акустическое сопротивление  $Z_A$  — это отношение звукового давления  $P$  к скорости колебаний  $v$  и имеет размерность —  $(\text{Па}\cdot\text{с})/\text{м}$ , или —  $\text{кгс}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ . Кроме того, удельное акустическое сопротивление  $Z_A$  — это произведение плотности материала  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) и скорости звука в нём  $C_A$  ( $\text{м}/\text{с}$ ). В твёрдых телах акустическое сопротивление значительно больше по сравнению с воздухом. Так для воздуха при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении 760 мм.рт.ст. удельное акустическое сопротивление  $Z_A = 413 \text{ кгс}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ .

Связь между звукофизическими параметрами:

$$\Lambda = C_A/f; J = P \cdot v; J = P^2/Z_A; Z_A = P/v; Z_A = \rho \cdot C_A; \mathcal{E} = J/C_A.$$

В акустике, а также в измерительных приборах, используют уровни параметров ЗФС (обозначается  $L$ ). За уровень параметра (давления, интенсивности, плотности энергии), используется логарифмическая шкала, которая позволяет сжать масштаб измерения и получить не завышенные для восприятия человека цифровые значения. Если в основе единицы измерения используют натуральный логарифм, то единица измерения носит название непер (русск. — Нп, межд. — Нр), в честь шотландского математика Джона Непера (16 век). В основе десятичного логарифма единица измерения — децибел (дБ) или десятая часть бел (0,1), причём: 1 Нп = 8,08 дБ или 1 дБ = 0,115 Нп.

Уровень параметра: интенсивности звуковой волны —  $J$ , звукового давления —  $P$ , плотности энергии —  $\mathcal{E}$ , то есть соответственно:  $L_J, L_P, L_{\mathcal{E}}$ , относят к нулевому значению их уровня или к нулевому уровню.

За нулевой уровень интенсивности звука  $J_0$  принята интенсивность  $J_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> (или шёпот, при  $v = 1000$  Гц). Абсолютный уровень интенсивности в децибелах для воздуха при нормальных атмосферных условиях:

$$L_J = 10 \lg (J/J_0) = 10 \lg (J/10^{-12}) = 10 \lg J + 120, \text{ дБ.}$$

Например: интенсивность звука составляет  $J = 10^{-4}$  Вт/м<sup>2</sup>. Тогда уровень интенсивности  $L_J = 10 \lg (J/J_0) = 10 \lg (10^{-4}/10^{-12}) = 10 \lg 10^8 = 80$  дБ. Либо также:  $L_J = 10 \lg J + 120 = 10 \lg (10^{-4}) + 120 = 120 - 40 = 80$  дБ. Причём, в данном случае, нулевое значение уровня интенсивности  $J_0$  соответствует удельному акустическому сопротивлению воздуха  $R_A = 400$  кгс/(м<sup>2</sup>·с).

За нулевой уровень по звуковому давлению  $P_0$  принято условно действующее звуковое давление, соответствующее нулевому значению уровня интенсивности, равному  $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па. Абсолютный уровень по звуковому давлению в децибелах для воздуха при нормальных атмосферных условиях:

$$L_P = 20 \lg (P/P_0) = 20 \lg (P/2 \cdot 10^{-5}) = 20 \lg P + 94 \text{ дБ.}$$

Например, звуковое давление  $P = 0,2$  Па. Тогда уровень по звуковому давлению  $L_P = 20 \lg (P/P_0) = 20 \lg (0,2/2 \cdot 10^{-5}) = 20 \lg 10^4 = 80$  дБ.

$$\text{Либо также: } L_P = 20 \lg P + 94 = 20 \lg (0,2) + 94 = 94 - 14 = 80 \text{ дБ.}$$

Уровень по плотности энергии в децибелах для воздуха принято определять относительно плотности, соответствующей нулевому значению интенсивности для скорости звука, равной  $C_A = 333$  м/с, а нулевой уровень плотности энергии составляет  $\mathcal{E}_0 = 3 \cdot 10^{-15}$  Дж/м<sup>3</sup>. Абсолютный уровень по плотности энергии  $\mathcal{E}$  в децибелах для воздуха при нормальных условиях:

$$L_{\mathcal{E}} = 10 \lg (\mathcal{E}/\mathcal{E}_0) = 10 \lg (\mathcal{E}/3 \cdot 10^{-15}), \text{ дБ.}$$

Например: плотность энергии  $\mathcal{E} = 3 \cdot 10^{-7}$  Дж/м<sup>3</sup>. Тогда уровень по плотности энергии:  $L_{\mathcal{E}} = 10 \lg (\mathcal{E}/\mathcal{E}_0) = 10 \lg (3 \cdot 10^{-7}/3 \cdot 10^{-15}) = 10 \lg 10^8 = 80$  дБ.

Если уровень параметра  $L$  известен, либо определён в децибелах, то соответственно: интенсивность  $J$  (Вт/м<sup>2</sup>), звуковое давление  $P$  (Па) и плотность энергии  $\mathcal{E}$  (Дж/м<sup>3</sup>) для воздуха при нормальных атмосферных условиях:

$$J = J_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_J}, \text{ (Вт/м}^2\text{);}$$

$$P = P_0 \cdot 10^{0,05 \cdot L_P}, \text{ (Па);}$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{\mathcal{E}}}, \text{ (Дж/м}^3\text{).}$$

Например: уровень параметра  $L = 120$  дБ, тогда соответственно: интенсивность, звуковое давление и плотность энергии для воздуха при нормальных атмосферных условиях составит:

$$J = J_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L} = 10^{-12} \cdot 10^{-0,1 \cdot 120} = 1 \text{ (Вт/м}^2\text{)};$$

$$P = P_0 \cdot 10^{0,05 \cdot L} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,05 \cdot 120} = 20 \text{ (Па)};$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L} = 3 \cdot 10^{-15} \cdot 10^{0,1 \cdot 120} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ (Дж/м}^3\text{)}.$$

Относительный уровень любого параметра  $L_{\text{отн}}$  (например, интенсивности звука, звукового давления и т.п.) равен разности абсолютных (или измеренных) параметров до и после ограждения, перегородки, стены и т.п. В частности, в реверберационной камере относительный уровень используют для исследования звукоизоляции и других параметров перегородок.

Для проектирования и эксплуатации ограждений зданий и помещений, систем вещания и связи, звукоусиления, звукопоглощения и шумоизоляции, необходимо знать свойства и пределы слуха человека. Уровень ощущения или область слухового восприятия человека (порог осязания) ограничивается снизу порогом слышимости, а сверху — болевым порогом и охватывает диапазон частот от 20 до 20000 Гц.

Значение болевого порога (ощущения боли) на максимуме по интенсивности звука составляет:  $J = 1 \text{ Вт/м}^2$ , а минимального порога слышимости составляет на частоте 1000 Гц:  $J = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ , а на частоте 3000 Гц около  $J = 10^{-13} \text{ Вт/м}^2$ . Поэтому динамический диапазон по уровню звука от порога слышимости до болевого порога составляет около 130 дБ.

Субъективную меру чёткости колебаний звука называют высотой звука. Высота тона с частотой 1000 Гц и с уровнем ощущения 40 дБ считается равной 1000 мел или 10 барк (1 барк = 100 мел).

Уровень громкости любого звука (или шума) — это уровень в децибелах принятого равногромкого с ним чистого тона 1000 Гц, а за единицу уровня громкости принят фон, а именно:  $L_{\text{фон}} = L_{1000 \text{ Гц}}$  (дБ), при равной громкости испускаемого звука и громкости тона в 1000 Гц.

Абсолютный уровень интенсивности  $J$ , звукового давления  $P$ , плотности энергии  $\varepsilon$ , для воздуха при нормальных атмосферных условиях (дБ):

$$L_J = 10 \lg (J/J_0); \quad L_P = 20 \lg (P/P_0); \quad L_\varepsilon = 10 \lg (\varepsilon/\varepsilon_0).$$

В табл. 2.1 приведены примерные источники звука, уровень их ощущения, уровень параметра  $L$  (дБ), а также рассчитанные по уровню параметра для воздуха (при частоте  $\nu = 1000$  Гц) соответственно: интенсивность звука  $J$  (Вт/м<sup>2</sup>), звуковое давление  $P$  (Па), плотность энергии  $\varepsilon$  (Дж/м<sup>3</sup>).

Таблица 2.1. Источник звука, уровень ощущения, уровень параметра  $L$ , интенсивность звука  $J$ , звуковое давление  $P$  и плотность энергии  $\mathcal{E}$  для воздуха при нормальном атмосферном давлении и частоте  $\nu = 1000$  Гц

Источник звука	Уровень ощущения	Уровень параметра $L$ (дБ)	Интенсивность звука $J$ (Вт/м <sup>2</sup> )	Звуковое давление $P$ (Па)	Плотность энергии $\mathcal{E}$ (Дж/м <sup>3</sup> )
1	2	3	4	5	6
Шепот	Порог слышимости	0	$10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-15}$
Падение капли воды	Область слухового восприятия	20	$10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-13}$
Негромкий разговор		40	$10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-11}$
Автомобиль на асфальте		60	$10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-9}$
Симфонический оркестр		80	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Отбойный молоток		100	$10^{-2}$	$2 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^{-5}$
Двигатель самолёта	Болевой порог	120	$10^0$	$2 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^{-3}$

В реальной среде (воздухе) звуковые волны затухают вследствие вязкости среды и вследствие молекулярного затухания. Звуковые волны затухают при распространении вдоль поглощающей поверхности, причём прямо пропорционально коэффициенту поглощения этой поверхности. Процесс затухания колебаний в помещении носит название *реверберации*.

Если звуковая волна, падая на поверхность раздела двух сред (как и световая волна), частично проходит в другую среду, а среды имеют переменные параметры (плотность, атмосферное давление), то происходит преломление волны, либо изгиб. Также на изгиб звуковых волн сильно влияют ветер и потоки воздуха в различных направлениях.

*Интерференция* волн наблюдается, если две (и более) звуковые волны с одинаковой амплитудой, движутся в противоположном направлении, то в этом случае образуется стоячая волна с пучностями и узлами. В стоячих волнах поток энергии равен нулю, поэтому их характеризуют плотностью энергии  $\mathcal{E}$  или квадратом звукового давления  $P^2$ . Поток энергии создается только бегущей волной. Плотность энергии  $\mathcal{E}$  состоит из плотности бегущей волны и плотности стоячей волны.

Если звуковая волна встречает препятствие (ограждение), либо идёт по краю препятствия, либо попадает в проём окна, двери, то наблюдается *дифракция* волн вокруг препятствия. Если звуковая волна встречает на своём пути препятствие, то происходит также и отражение звуковой волны.

Возможны различные комбинации распространения волн, а в общем случае при изучении их воздействия на ограждения зданий, преграды, необходимо рассматривать их как шумы. *Шумы* — это звуки, образующие набор частот или сплошной спектр частот, непрерывно заполняющий интервал времени. В реальных условиях среды (воздуха) и твёрдых тел (ограждений) наблюдается плоская, сферическая и цилиндрическая волна.

В *плоской волне* звуковые лучи идут параллельно друг другу, энергия не расходуется в стороны, интенсивность звука практически не зависит от расстояния прошедшей волны, как и амплитуда звукового давления и скорости колебаний, но при условии, если не учитывать потери на вязкость среды, молекулярное рассеяние, затухание и дифракцию волн.

В *сферической волне* звуковые лучи совпадают с радиусом сферы, источник колебаний находится в центре, мощность звука не изменяется от удаления от источника, если пренебречь потерями на вязкость среды и молекулярное рассеяние. Интенсивность звука с удалением от источника уменьшается по квадратичному закону  $J_R = J/r^2$ , а звуковое давление с расстоянием от источника звука ( $r$ ) уменьшается по гиперболическому закону  $p_R = p/r$ .

В *цилиндрической волне* звуковые лучи совпадают с радиусами цилиндра, а ось цилиндра с осью источника звука. Интенсивность звука убывает от источника звука по гиперболическому закону  $J_R = J/r$ , а звуковое давление — по закону  $p = p/\sqrt{r} = p/r^{0.5}$ . В бесконечно длинной трубе образуется плоская бегущая волна, а в трубе конечных размеров происходит отражение звуковых волн от ее концов и в трубе образуется две бегущие волны с встречным направлением.

При распространении звуковых волн в трубах и в открытых пространствах пользуются понятием объемной скорости и волновым сопротивлением [XX]. *Объемная скорость*  $W_{\text{ТР}}$  звуковых (акустических) волн в трубах — это произведение скорости колебаний частиц среды  $u$  и площади поперечного сечения трубы  $F_{\text{ТР}}$ :  $W_{\text{ТР}} = u \cdot F_{\text{ТР}}$  (м<sup>3</sup>/с).

*Волновое сопротивление*  $Z_{\text{ТР}}$  звуковых (акустических) волн в трубах — это отношение звукового давления  $P$  к объемной скорости  $W_{\text{ТР}}$  в данном сечении трубы:  $Z_{\text{ТР}} = P/W_{\text{ТР}}$ , (Па·с)/м<sup>3</sup>. Волновое сопротивление  $Z_{\text{ТР}}$  и удельное акустическое сопротивление  $z_A$  связано соотношением:  $Z_{\text{ТР}} = z_A/F_{\text{ТР}}$ . Полное сопротивление численно равно:  $Z = z_A \cdot F_{\text{ТР}} = Z_{\text{ТР}} \cdot (F_{\text{ТР}})^2$ , (Па·с·м).



### 2.3 Звукофизические свойства твердых тел

Все тела непрерывно посылают в окружающее их пространство электромагнитные волны различной частоты (длины). Большинство твёрдых тел излучают волны с длиной волны от нуля до бесконечности, в том числе и звуковые волны. Твёрдые тела излучают и поглощают энергию волн поверхностно — поверхностное излучение (поглощение), а газы объёмом — объёмное излучение (поглощение). Энергия волн любой длины всегда превращается или трансформируется в тепловую энергию.

Если звуковая волна или луч на своём пути встречает какое-либо твердое тело, то из всего общего количества падающей на тело энергии —  $J_{\text{пад}}$  часть её отражается в окружающее пространство —  $J_{\text{отр}}$ . Некоторая доля падающей энергии проникает в тело, поглощается —  $J_{\text{пог}}$  и трансформируется в объёмную энергию  $\mathcal{E}$  (Дж/м<sup>3</sup>), а оставшаяся часть —  $J_{\text{пр}}$ , проходит сквозь тело и через окружающее пространство, после чего попадает на другие тела.

Следовательно, энергия падающей звуковой волны может быть условно разделена на три части: отражённую, поглощённую и пропущенную, т.е.:  $J_{\text{пад}} = J_{\text{отр}} + J_{\text{пог}} + J_{\text{пр}}$ .

В литературе по акустике [1] для количественной оценки каждой части энергии звуковой волны вводят следующие определения или коэффициенты:

- коэффициент отражения  $\alpha_{\text{отр}}$  — отношение интенсивности отражённой звуковой волны к интенсивности падающей волны, т.е.  $\alpha_{\text{отр}} = J_{\text{отр}}/J_{\text{пад}}$ ;
- коэффициент поглощения  $\alpha_{\text{пог}}$  — отношение интенсивности поглощённой энергии звуковой волны к интенсивности падающей волны, т.е.  $\alpha_{\text{пог}} = J_{\text{пог}}/J_{\text{пад}}$ ;
- коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  — отношение интенсивности прошедшей (пропущенной) звуковой волны к интенсивности падающей волны, т.е.  $\alpha_{\text{пр}} = J_{\text{пр}}/J_{\text{пад}}$ .

В соответствии с законом сохранения энергии  $\alpha_{\text{пог}} + \alpha_{\text{отр}} + \alpha_{\text{пр}} = 1$ .

Однако в справочной литературе [1] приведены значения коэффициентов для одного и того же материала (вещества), которые в сумме превышают единицу. Это обусловлено тем, что при явлении дифракции наблюдается превышение одного только коэффициента звукопоглощения больше единицы. Поэтому необходимо четко определиться в том, что при попадании звуковых волн с интенсивностью  $J_{\text{пад}}$  на какую-либо перегородку (ограждение) значительных и больших размеров в сравнении с длиной звуковой волны, коэффициенты поглощения и звукопроводности определяются при условии отсутствия отражения звука в пространстве до и после перегородки (ограждения).

В связи с этим, более правильно называть эти коэффициенты (отражения, поглощения, звукопроводности) — коэффициентом по интенсивности: отражения, поглощения и звукопроводности.

*Коэффициент по интенсивности отражения* или эффективность отражения звука зависит от степени различия акустических сопротивлений обеих сред, а также от угла падения звуковых волн. Акустическое сопротивление (т.е. произведение плотности материала и скорости звука в нём) в твёрдых телах значительно больше по сравнению с воздухом, поэтому коэффициент отражения приближается к единице.

*Коэффициент по интенсивности поглощения* или эффективность поглощения звука различными материалами определяется нормальным коэффициентом поглощения (для угла падения  $90^\circ$ ) и диффузным коэффициентом поглощения (для различных углов падения звука). Коэффициент поглощения зависит от частоты звука, от толщины материалов и состояния их поверхности. Большинство материалов, кроме того, имеют не монотонную зависимость коэффициента поглощения от частоты.

Для внутренних помещений зданий существуют санитарные нормы по уровню шумов. Для снижения уровня шума необходимо увеличение общего поглощения в помещениях, ограждениях зданий, стен, перекрытий, пола, оконных блоков. Коэффициенты поглощения материалов и изделий зависят от частоты, но общее поглощение характеризует весь диапазон частот.

*Коэффициент по интенсивности звукопроводности* или эффективность передачи звуковых колебаний через перегородки (ограждения) в реальных условиях зависит от воздушного, материального и мембранного способа передачи звуковой энергии. Воздушный перенос осуществляется через неплотности, поры материала, щели (окна, двери и т.п.). Для снижения воздушного переноса в ограждениях заделывают поры и щели.

Материальный перенос осуществляется посредством колебаний через материал стены или по трубам систем отопления, водоснабжения, канализации, воздуховодам, в виде продольных колебаний частиц. Мембранный перенос осуществляется посредством поперечных колебаний перегородки, а для уменьшения мембранного переноса стены выполняют массивными.

Также, для уменьшения воздушного и материального переноса, материалы слоёв перегородки должны иметь резко отличающиеся акустические сопротивления (например: бетон-поролон), а стены ограждений и оконных блоков выполняют с поглощающим материалом между ними. Для уменьшения шума, создаваемого вибрациями, источники звука устанавливают на виброизолирующие опоры или прокладки.

Следует отметить, что любые отверстия в ограждении, открытое окно, в силу явления дифракции, увеличивают в разы звукопроводность и снижают

звукоизоляцию. Так например, круглые отверстия в стене ограждения, перегородки размером  $10 \text{ см}^2$  даёт снижение звукоизоляции на  $\approx 10 \text{ дБ}$ .

Безразмерный коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  представленный в логарифмической шкале, носит название звукоизоляции:  $R_{\text{ЗВ}}$ , дБ.

Коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  и звукоизоляция  $R_{\text{ЗВ}}$  перегородки (ограждения), в зависимости от звукового давления имеют вид:

$$\alpha_{\text{пр}} = J_{\text{ПР}}/J_{\text{ПАД}} = (P_{\text{ПР}})^2/(P_{\text{ПАД}})^2,$$

$$R_{\text{ЗВ}} = L_{P(\text{ПАД})} - L_{P(\text{ПР})} = 20 \lg(P_{\text{ПАД}}/P_{\text{ПР}}),$$

где:  $J_{\text{ПАД}}$ ,  $J_{\text{ПР}}$  — интенсивность звуковой волны до и после (или с внешней и внутренней стороны) перегородки, Вт/м<sup>2</sup>;  $L_{P(\text{ПАД})}$  и  $L_{P(\text{ПР})}$  — уровни звукового давления до и после перегородки, дБ;  $P_{\text{ПАД}}$ ,  $P_{\text{ПР}}$  — соответственно звуковые давления в (Па) до и после перегородки.

Коэффициент звукопроводности и звукоизоляция имеют экспоненциальную зависимость:

$$\alpha_{\text{пр}} = 10^{-0,1 \cdot R_{\text{ЗВ}}}.$$

При нулевом значении звукоизоляции  $R_{\text{ЗВ}} = 0 \text{ дБ}$ , коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}} = 1$  (или 100 %); при  $R_{\text{ЗВ}} = 10 \text{ дБ}$ ,  $\alpha_{\text{пр}} = 0,1$  (или 10 %); при  $R_{\text{ЗВ}} = 20 \text{ дБ}$ ,  $\alpha_{\text{пр}} = 0,01$  (или 1 %). При увеличении звукоизоляции  $R_{\text{ЗВ}}$  более 20 дБ, коэффициент звукопроводности меньше 1% и еще более уменьшается.

## 2.4 Методика средних значений

В реальных условиях эксплуатации и строительства зданий и сооружений чаще всего используют ограждения, выполненные из смежных двух или трёх различных материалов. Например, оконный блок состоит из одно- или двухкамерного стеклопакета в пластиковом, деревянном или алюминиевом профиле, причем с различным соотношением площадей поверхностей.

Экспериментально определить тепло- и звукофизические свойства (ТЗФС) блока с различным соотношением смежных материалов вызывает трудности, поэтому для решения подобных задач предлагается *методика средних значений*.

Если перегородка, ограждение или блок состоит из нескольких смежных участков, то общая звукопроводность равна сумме звукопроводностей:

$$A_{\text{пр}} = \sum_k \alpha_{\text{пр.к}} \cdot F_{\text{пер.к}};$$

где:  $\alpha_{\text{пр.к}}$  — коэффициент звукопроводности  $k$ -ого участка блока (перегородки);  $F_{\text{пер.к}}$  — площадь  $k$ -ого участка перегородки, м<sup>2</sup>.

Среднее значение коэффициента звукопроводности:

$$\alpha_{\text{пр.ср}} = A_{\text{пр}}/F_{\text{пер}\Sigma} = A_{\text{пр}}/\sum_k F_{\text{пер.к}};$$

где:  $F_{\text{пер}\Sigma}$  — общая площадь блока (перегородки), м<sup>2</sup>.

По среднему значению  $\alpha_{\text{пр.ср}}$  вычисляется среднее значение звукоизоляции (дБ) блока:

$$R_{\text{ЗВ.ср}} = 10 \cdot \lg(1/\alpha_{\text{пр.ср}});$$

Среднее значение коэффициента теплопроводности блока:

$$\lambda_{\text{ср}} = \sum_k (\lambda_k \cdot F_{\text{пер.к}} / F_{\text{пер.}\Sigma});$$

где:  $\lambda_k$  — коэффициент теплопроводности  $k$ -ого смежного участка блока, Вт/(м·К).

Термическое сопротивление теплопроводности  $k$ -ого смежного участка толщиной  $\delta_k$  (м),:

$$R_k = \delta_k/\lambda_k, \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт.}$$

Среднее значение термического сопротивления теплопроводности блока со смежными участками:

$$R_{\text{ср}} = \sum_k (R_k \cdot F_{\text{пер.к}} / F_{\text{пер.}\Sigma});$$

где:  $R_k$  — термическое сопротивление теплопроводности  $k$ -ого смежного участка, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

## 2.5 Выводы по главе 2

1. В разделе приведены основные характеристики, определения, понятия, а также звукофизические свойства твердых тел.

2. Приведены зависимости коэффициента звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  и звукоизоляции  $R_{\text{ЗВ}}$ .

3. В работе приведена методика расчёта средних значений для ограждения, перегородки или блока состоящих из нескольких смежных участков:

- среднее значение коэффициента звукопроводности  $\alpha_{\text{пр.ср}}$ ;
- среднее значение звукоизоляции  $R_{\text{ЗВ.ср}}$ ;
- среднее значение коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{ср}}$ ;
- среднее значение термического сопротивления  $R_{\text{ср}}$ .

## ГЛАВА 3 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПОНЯТИЯ И ПРАВИЛА ТЕПЛО-ЗВУКОВОЙ АНАЛОГИИ

---

➤ *Наука достигает полной зрелости тогда, когда она начинает говорить языком математики.*

### 3.1 Основные положения и теоретические основы

Температурные и звуковые колебания (волны) распространяются в твердом теле по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях, экспериментальных установках или создаются самой природой при нагреве и охлаждении за сутки в ограждениях зданий и сооружений. Авторами монографии ранее разработаны теоретические основы и методы определения теплофизических (ТФС) свойств твердых строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля и устройство для его осуществления, которые приведены в патентах на изобретение:

— Патент РФ № 2788562. Способ определения комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов /В. М. Фокин, А. В. Ковылин. Заявл. 15.06.2022; Оpubл. 23.01.2023.

— Патент РФ № 2767468. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и устройство для его осуществления /В. М. Фокин, А. В. Ковылин, Д. Г. Усадский. Оpubл. 17.03.2022.

— Патент РФ № 2530441. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установка для его осуществления /В. М. Фокин, А. В. Ковылин, А. В. Попова; Оpubл. 10.10.2014.

— Патент РФ № 2421711. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов /В. М. Фокин, А. В. Ковылин. Заявл. 29.07.2009; Оpubл. 20.06.2011.

— Патент РФ № 2263901. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов /В. М. Фокин, В. Н. Чернышов. Заявл. 25.05.2004; Оpubл. 10.11.2005.

— Патент РФ № 2250454. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик твердых материалов /В. М. Фокин, В. Н. Чернышов, Г. П. Бойков. Заявл. 12.04.2004; Оpubл. 20.04.2005.

Для проведения математического эксперимента рассмотрим однородную, изотропную плоскую пластину (перегородку, стенку) или плоскую стену ограждения здания, для которых физические свойства постоянны и не зависят от температуры и влажности, деформации внутри объема (в связи с температурными напряжениями) незначительны по сравнению с объемом, а макро частицы внутри объема неподвижны относительно друг друга.

Пластина, либо стена ограждения здания или сооружения может считаться полупространством, пока тепловое или звуковое возмущение в достаточной мере не проникнет сквозь всю ее толщину.

В работе рассматриваются несколько вариантов нагрева или охлаждения различных тел, а также самых распространенных строительных, теплоизоляционных материалов и изделий, и металлов:

- пластина заданных размеров, для определения ТЗФС материала;
- стена ограждения здания или сооружения для определения ТЗФС;
- тело человека для определения степени температурного ощущения.

Причем физический эксперимент по нагреву или охлаждению пластины и ограждения здания или сооружения проводится с использованием различных методик и стандартных (промышленных) приборов, а также и разработанных авторами, и подтвержденными патентами [62...65, 90...96].

#### Вариант А. Пластина

Если пластина определенных размеров, толщиной  $\delta$ , с начальной температурой  $T_0$  подвергается интенсивному нагреву любым тепловым потоком (нагревателем) со стороны одной наружной поверхности ( $x = 0$ ) до температуры  $T_C$  и поддерживается неизменной на протяжении всего времени релаксации, то процесс переноса теплоты в плоской стенке (пластине) имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

с условиями однозначности (начальные и граничные)

$$T_{\tau=0} = T_0 ; T_{x=0} = T_C \quad (2)$$

Для решения уравнения (1) воспользуемся избыточными температурами:  $\vartheta = (T_C - T)$  и  $\vartheta_0 = (T_C - T_0)$ .

Тогда уравнение для пластины (1) примет вид:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} , \quad (3)$$

где  $a$  — температуропроводность вещества (материала),  $m^2/c$ .

В результате интенсивного теплового воздействия на наружную поверхность в пластине по толщине (глубине) образовывается тепловая волна, и как любая волна (воды, воздуха в природе), она перемещается от поверхности нагрева по всему объему вещества, но само вещество остается на месте.

Кроме того, тепловая или температурная волна, в зависимости от толщины пластины  $\delta$  и времени  $\tau$  станет затухающая, с определенной долей проникновения (или поглощения), например 25 % (0,25), 50 % (0,5) или др.

Распределение температур в теле (пластине) по толщине  $\delta$  осуществляется в зависимости от способа нагрева или охлаждения, а именно от начального режима и до упорядоченного или стационарного теплового режима.

Получается, что с одной стороны материальная реализация энергетического потенциала движется в пространстве и времени, а с другой — вещество остается на месте и существует вечно. Время также статично, как и пространство, а течение времени ощущается материей только тогда, когда через тело идет волна (все приходит и уходит). При использовании с обеих сторон в пластине нагревателя и холодильника, распределение температур и теплового потока по времени нагрева  $\tau$  приведено на рис. 3.1.

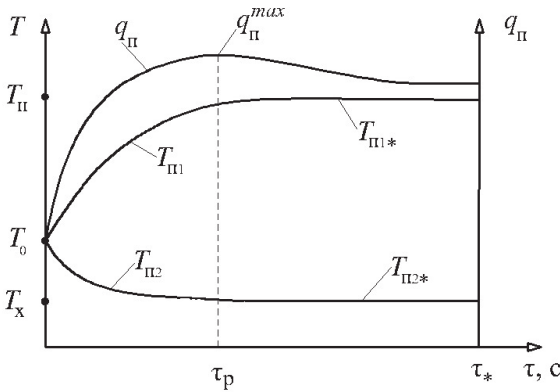


Рис. 3.1 Распределение температур  $T$  и теплового потока  $q_{\text{П}}$  в пластине:

- $T_0$  — начальная температура пластины;  $T_{\text{Н}}$  — температура нагревателя;
- $T_{\text{Х}}$  — температура холодильника;  $T_{\text{П1}}$  — температура пластины со стороны нагревателя;  $T_{\text{П2}}$  — температура пластины со стороны холодильника;
- $T_{\text{П1}^*}$  — температура поверхности пластины со стороны нагревателя в стационарном режиме;  $T_{\text{П2}^*}$  — температура поверхности пластины со стороны холодильника в стационарном режиме;
- $q_{\text{П}}$  — тепловой поток на поверхности пластины со стороны нагревателя;
- $q_{\text{П}}^{\text{max}}$  — максимальный тепловой поток на поверхности пластины;
- $\tau_{\text{р}}$  — время наступления упорядоченного теплового режима в пластине или достижения максимального теплового потока;
- $\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима в пластине.

По истечении некоторого отрезка времени  $\tau_p$  от начала процесса нагрева, который называется начальным периодом (описывается сложными математическими уравнениями), внешнее тепловое воздействие затронет в какой-то мере центральные участки объема пластины и наступит упорядоченный тепловой режим. Интенсивность теплоты или плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева (нагревателя) в этот момент времени ( $\tau_p$ ) достигнет максимума  $q_{II}^{max}$ , а затем, на всем протяжении дальнейшего процесса нагрева, останется либо постоянным, либо с определенным темпом незначительно изменяясь снижается, в зависимости от граничных условий охлаждения пластины на поверхности со стороны охлаждения  $T_{II2}$ .

Температура на поверхности пластины  $T_{II1}$  со стороны нагревателя в течение времени изменяется (растет при нагреве или снижается при охлаждении) по экспоненциальному закону от начальной температуры  $T_0$ , проходит стадию упорядоченного теплового режима и выходит на стационарный тепловой режим  $T_{II1*}$  (или становится равной температуре нагревателя  $T_H$ ).

Температура на поверхности пластины  $T_{II2}$  со стороны охлаждения или холодильника изменяется (уменьшается или увеличивается в зависимости от условий охлаждения) от начальной температуры  $T_0$ , а затем, в течение времени выходит на стационарный тепловой режим  $T_{II2*}$  или становится равной температуре холодильника  $T_X$ . В зависимости от условий охлаждения пластины со стороны холодильника, поверхность  $T_{II2}$  может уменьшаться или увеличиваться относительно начальной температуры пластины  $T_0$ .

Начальный период нагрева (охлаждения) заканчивается, когда плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева станет максимальной и наступит упорядоченный тепловой режим, который в течение времени переходит либо в стационарный тепловой режим, либо в термодинамическое равновесие, в зависимости от граничных условий и экспериментальной установки или метода его осуществления. В начальный период нагрева (до  $\tau_p$ ) часть тепловой энергии затрачивается на аккумуляцию тела.

При несимметричном нагреве пластины, по истечении времени, упорядоченный тепловой режим вписывается в стационарную стадию. Время от наступления упорядоченного теплового режима ( $\tau_p$ ) до времени наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ) определяет только половину времени полного периода гармонического колебания температурной волны, а вторая половина времени условно отводится на охлаждение пластины. Поэтому, обосновано считать, что частота колебаний температурной полуволны  $\nu$  зависит от промежутка времени  $\tau_*$  и составит  $\nu = 1/\tau_*$ , а частота гармонических колебаний полной температурной волны составит  $\nu = 1/2\tau_*$ .



На рис. 3.2 приведено теоретическое распределение температур на поверхности тела  $T_{\Pi}$  любой конфигурации (призма, пластина, цилиндр, куб, шар) и в его центре  $T_{Ц}$  при воздействии теплового потока любой интенсивности. Причем, нагрев тела возможен реальный, а охлаждение условное.

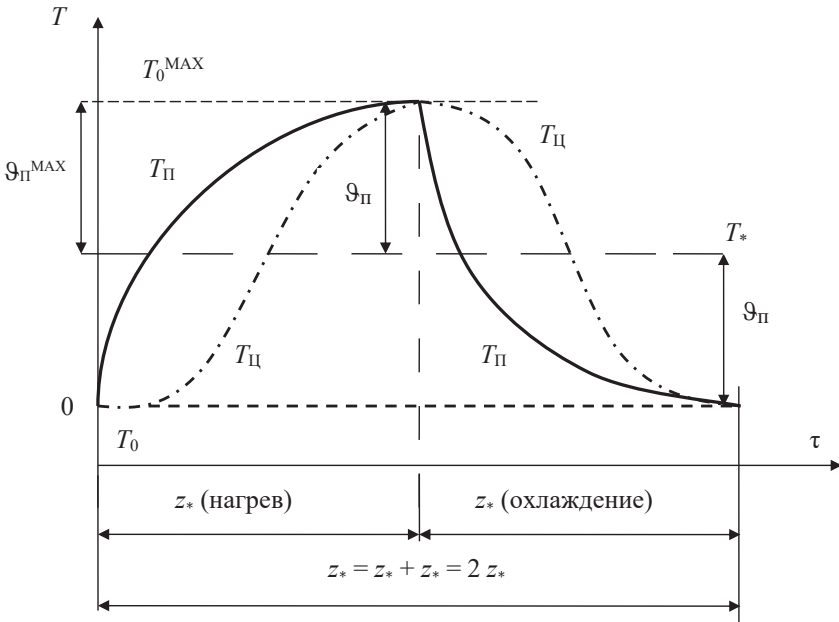


Рис. 3.2 График изменения температурной полуволны при нагреве и полуволны при охлаждении на поверхности призмы:

$T_{\Pi}$  — температура поверхности;  $T_{Ц}$  — температура центра;  $T_0$  — начальная температура;  $T_*$  — средняя температура призмы;  $T_0^{\text{MAX}}$  — максимальная температура, полученная при нагреве до термодинамического равновесия;

$\Theta_{\Pi}^{\text{max}}$  — амплитуда колебаний на поверхности (максимальное отклонение температуры поверхности от средней температуры материала);  $\Theta_{\Pi}$  — избыточная текущая температура на поверхности призмы;  $z_*$  — полуволна при нагреве и охлаждении призмы;  $z$  — полный период гармонических колебаний температурной волны на поверхности призмы.

Очевидно, что время подъема температурной полуволны  $z_*$  (в процессе нагрева) и время спада температурной полуволны (в процессе охлаждения) будет показывать только половину, от времени полного периода гармонического колебания температурной волны ( $z = 2 \cdot z_* = 2 \cdot \tau$ ).

Темп нагрева (охлаждения)  $\beta$  измеряется на поверхности пластины со стороны нагрева, когда достигается максимальная интенсивность теплоты или

плотность теплового потока на поверхности (рис. 1). В этот момент времени ( $\tau_p$ ) темп нагрева  $\beta$  на поверхности пластины со стороны нагревателя, будет максимальным и составит:  $\beta = \Delta T_{\text{пл}}/\tau_p$ , где  $\Delta T_{\text{пл}}$  — прирост температуры на поверхности пластины  $T_{\text{пл}}$  со стороны нагрева от начальной температуры пластины  $T_0$  до  $\Delta T_{\text{пл}}$ , за время  $\tau_p$ .

В процессе распространения теплоты образуется волна, которая выравнивает температуры на поверхности пластины и в теле по определенным законам. В стационарном тепловом режиме распределение температур в теле (пластине) по толщине  $\delta$  осуществляется по закону Фурье (Жан Батист Ф.):

$$q = -\lambda \frac{\partial \vartheta_{x,\tau}}{\partial x} \quad (4)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности (теплопроводность), Вт/(м·К).

В стадии наступления стационарного теплового режима в пластине (время  $\tau_*$ ), число Фурье  $Fo = (a \cdot \tau_*)/\delta^2$ , разность температур  $\Delta T_* = T_H - T_X$  или  $\Delta T_* = T_{\text{пл}1*} - T_{\text{пл}2*}$ , а тепловой поток в пластине имеет вид:

$$q_{\text{пл}}^* = \lambda (\Delta T_*/\delta) = (\lambda/\delta) \cdot (T_H - T_X) = (\lambda/\delta) \cdot (T_{\text{пл}1*} - T_{\text{пл}2*}). \quad (5)$$

Если, в период наступления стационарной стадии нагрева ( $\tau_*$ ) известна интенсивность теплоты или плотность теплового потока  $q_{\text{пл}}^*$  на поверхности, толщина пластины  $\delta$  и перепад температур по толщине  $\Delta T_*$ , то теплопроводность равна:

$$\lambda = (q_{\text{пл}}^* \cdot \delta)/\Delta T_* = (q_{\text{пл}}^* \cdot \delta)/(T_H - T_X) = (q_{\text{пл}}^* \cdot \delta)/(T_{\text{пл}1*} - T_{\text{пл}2*}). \quad (6)$$

Известно, что теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), весовая (массовая) теплоемкость ( $c$ ) и плотность ( $\rho$ ) материала или вещества, связаны соотношениями:

$$a = \lambda/(c\rho), \text{ м}^2/\text{с}, \quad (7)$$

$$\lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), \quad (8)$$

$$(c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}), \quad c = (c\rho)/\rho, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \quad (9)$$

Следует отметить, что дифференциальное уравнение теплопроводности (1) и волновое уравнение для плоской акустической волны [26], как и частное решение волнового уравнения имеют один вид.

**Вариант Б.** Ограждение здания (плоская стенка)

Ограждения зданий (жилых и общественных) по температурному режиму за одни сутки подчиняются закону простого гармонического колебания

— температура внутренней поверхности ограждения остается примерно постоянной (а точнее, температура внутренней поверхности помещения за сутки не должна изменяться, более чем на  $2 \dots 3$  °C), а температура наружной поверхности здания изменяется (день или ночь). В дневные часы температура ограждения здания на наружной поверхности обычно выше, а в ночные часы — ниже. Плотность теплового потока  $q_{\Pi}$  на поверхности ограждения здания изменяется в течение суток, а именно — в ночные часы  $q_{\Pi}$  выше, а в дневные часы  $q_{\Pi}$  — ниже. Однако следует отметить, что в одном случае, а именно в жаркий летний период максимальный тепловой поток наблюдается в дневные часы, от нагретого воздуха внутрь помещения (рассмотрено ниже).

Гармонические колебания температур в ограждении здания не вписываются в стационарную стадию, а периодический процесс нагрева и охлаждения проходит в ограждении по закону косинуса и в течение суток могут быть рассмотрены путем наложения косинусоид. В процессе изменения температуры на наружной поверхности ограждения здания ( $x = 0$ ) в прямом и обратном направлениях внутри ограждения здания удастся получить температурные волны, которые угасая идут в глубину объема массива.

Дифференциальное уравнение, описывающее явление распространения температурных волн в пластине — ограждении здания имеет вид (1). Если процесс теплового колебания на наружной поверхности ограждения здания продолжается достаточно часто, то начальные условия не будут сказываться на распространении температуры, то есть начальные условия в условиях однозначности (2) можно не рассматривать. Для решения уравнения (1) воспользуемся избыточными температурами:

$\vartheta_{x,\tau} = (T_{x,\tau} - T_*)$  — избыточные температуры температурной волны или отклонения температуры  $T_{x,\tau}$  массива (материала) в определенной точке "x", в определенное время "τ", от температуры релаксации  $T_*$ , или амплитуда колебаний избыточной температуры, °C;

$\vartheta_x^{max} = (T_x^{max} - T_*)$  — затухающие амплитуды колебаний температурной волны по глубине ограждения или максимальное отклонение температуры по глубине от температуры релаксации, °C;

$\vartheta_{\Pi}^{max} = (T_{\Pi}^{max} - T_*) = 0,5 (T_{\Pi}^{max} - T_{\Pi}^{min})$  — максимальная амплитуда колебаний температурной волны на наружной поверхности ограждения здания или максимальное отклонение температуры на наружной поверхности ограждения от температуры релаксации, °C.

На рис. 3.3 приведен график распределения температур и тепловых потоков в ограждении здания при циклическом (в течение суток) подводе (отводе) теплоты к его наружной поверхности.

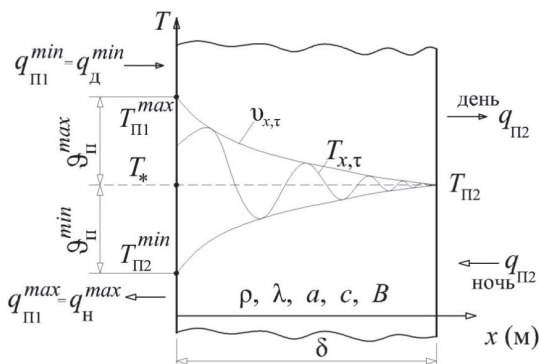


Рис. 3.3 Распределение температур и тепловых потоков ограждения здания при подводе (отводе) теплоты к его наружной поверхности по закону гармонического колебания в течении суток

$\delta$  — толщина пластины, изделия, м;

$\rho$  — удельная плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\lambda$  — теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

$a$  — температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$(c\rho)$  — объемная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ ;

$B$  — коэффициент теплоусвоения,  $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$ ;

$T_*$  — температура релаксации,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_{x,\tau}$  — температурная волна,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{\Pi 1}^{max}$ ,  $T_{\Pi 1}^{min}$  — максимальная (в дневные часы) и минимальная (в ночные часы) температуры на наружной поверхности ограждения здания,  $^\circ\text{C}$ ;

$T_{\Pi 2}$  — температура на внутренней поверхности ограждения здания,  $^\circ\text{C}$ ;

$q_{\Pi 2}$  — плотность теплового потока на внутренней поверхности ( $\Pi_2$ ) ограждения здания,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$q_H^{max} = q_{\Pi 1}^{max}$  — максимальный тепловой поток на наружной поверхности ( $\Pi_1$ ) ограждения здания в ночные часы,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$q_D^{min} = q_{\Pi 1}^{min}$  — минимальный тепловой поток на наружной поверхности ( $\Pi_2$ ) ограждения здания в дневные часы,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\vartheta_{x,\tau}$  — амплитуда колебаний избыточной температуры полуволны,  $^\circ\text{C}$ ;

$\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда колебаний температурной волны на наружной поверхности ограждения здания,  $^\circ\text{C}$ ;

После подстановки избыточных температур в дифференциальное уравнение (1), описывающее явление распространения температурных волн в пла-

стине (вариант А) и в ограждении стены здания (вариант Б), дифференциальное уравнение (1) переходит в уравнение (3), а косинусоида температурных и звуковых колебаний внутри пластины и внутри ограждения здания имеет общий вид:

$$\vartheta_{0,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{max} \cdot \cos(\omega\tau), \quad (10)$$

где  $\omega$  — угловая (круговая) частота колебаний, 1/с.

Решение системы уравнений (3) и (10) примет вид:

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{max} \cdot \cos(\omega\tau - kx) e^{-kx}, \quad (11)$$

где:  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда колебаний температурной (или акустической) волны на поверхности пластины со стороны нагревателя или на наружной поверхности ограждения здания, °С;  $k$  — волновое число, 1/м;  $x$  — текущая координата по толщине тела, м.

В пластине (рис. 1), как и в любом другом теле (призма, куб, цилиндр, шар) максимальная амплитуда колебаний температурной волны на поверхности со стороны нагрева определяется в упорядоченном или в стационарном тепловом режиме по формуле:

$$\vartheta_{\Pi}^{max} = 0,5 (T_{\Pi} - T_0) = 0,5 (T_{\Pi 1*} - T_0). \quad (12)$$

В ограждении здания на наружной поверхности (рис. 3) максимальная амплитуда колебаний температурной волны определяется по формуле:

$$\vartheta_{\Pi}^{max} = 0,5 (T_{\Pi 1}^{max} - T_{\Pi 1}^{min}). \quad (12a)$$

Если в стене ограждения здания (рис. 3) известна (или замерена) толщина стены  $\delta_{СТ}$ , максимальная плотность теплового потока  $q_{\Pi 1}^{max}$  на наружной поверхности ограждения здания (обычно в ночные часы), максимальная разность температур стены  $\Delta T_{СТ}$  между внутренней  $T_{ВН}$  и наружной  $T_{НАР}$  температурами ограждения, что обычно наблюдается в момент максимального теплового потока  $q_{\Pi 1}^{max}$  (или близкого к нему), то теплопроводность определяется по формуле:

$$\lambda = (q_{\Pi 1}^{max} \cdot \delta_{СТ}) / \Delta T_{СТ} = (q_{\Pi 1}^{max} \cdot \delta_{СТ}) / (T_{ВН} - T_{НАР}), \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}. \quad (13)$$

Угловая (круговая) частота колебаний температурной волны  $\omega_{Т}$  и акустической волны  $\omega_{А}$  в пластине, а также в ограждении здания, соответственно равна:

$$\omega_{Т} = 2\pi/z, \text{ 1/с}, \quad (14)$$

$$\omega_{А} = 2\pi f, \text{ 1/с}, \quad (15)$$

где:  $z$  — полный период колебания температурной волны, с;  $f$  — частота звуковых колебаний,  $\text{с}^{-1}$ .

Очевидно, что в ограждении здания (рис.3) при циклическом (в течение суток) подводе (и отводе) теплоты к его наружной поверхности, полный период колебания температурной волны  $z$  составит  $z = 24$  час или 86400 с, а частота колебаний температурной волны:  $\nu = 1/z$  (1/с).

Также очевидно, что в пластине (рис.1, рис. 2) время подъема температурной полуволны  $\tau_*$  в процессе нагрева до упорядоченного или стационарного теплового режима и время предполагаемого спада температурной полуволны в процессе охлаждения будет показывать только половину от времени полного периода колебаний температурной волны, а именно:  $z = 2\tau_*$ .

Тогда угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в пластине и в ограждении здания будут иметь соответственно вид

— в пластине при упорядоченном и стационарном тепловом режиме:

$$\omega_T^{\text{пл}} = 2\pi/z = 2\pi/2\tau_* = \pi/\tau_*, 1/\text{с}, \quad (16)$$

— в стене ограждения здания в течение суток

$$\omega_T^{\text{ст}} = 2\pi/z = 2\pi/86400, 1/\text{с}, \quad (17)$$

где 86400 с — время цикла за сутки (24 час).

Волновое число  $k$  для температурной волны  $k_T$  и звуковой (акустической) волны  $k_A$  соответственно равны:

$$k_T = \sqrt{\omega_T/2a}, \text{ м}^{-1}, \quad (18)$$

$$k_A = \omega_A/C_A, \text{ м}^{-1}, \text{ или} \quad (19)$$

$$k_A = (2\pi f)/C_A, \text{ м}^{-1}, \quad (19 \text{ а})$$

где  $a$  — температуропроводность материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C_A$  — скорость звука в материале,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $f$  — частота звука,  $\text{с}^{-1}$ .

Тогда волновое число для пластины в упорядоченном тепловом режиме и в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), согласно выражения (16) и (18) равно:

$$k_T^{\text{пл}} = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_*)}, \text{ м}^{-1}. \quad (20)$$

Следовательно, если будет известно волновое число в пластине  $k_T^{\text{пл}}$ , то полученное уравнение (20) позволяет определить температуропроводность пластины в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), либо время наступления стационарного теплового режима в пластине, а именно:

$$a = \pi / [2\tau_* (k_T^{пл})^2], \text{ м}^2/\text{с}, \quad (20a)$$

$$\tau_* = \pi / [2a (k_T^{пл})^2], \text{ с}. \quad (20б)$$

Волновое же число для стенки ограждения здания за период 24 час, согласно выражения (17) и (18), будет равно:

$$k_T^{ст} = \sqrt{\pi / (a \cdot z)}, \text{ м}^{-1}. \quad (21)$$

Следовательно, если будет известно волновое число для стенки ограждения здания  $k_T^{ст}$  за период 24 час, то полученное уравнение (21) позволяет определить теплопроводность ограждения здания, а именно:

$$a = \pi / [z (k_T^{ст})^2] = \pi / [86400 (k_T^{ст})^2], \text{ м}^2/\text{с}, \quad (21a)$$

Косинусоида температурной волны в пластине в стадии упорядоченного или стационарного теплового режима (при  $\tau = \tau_*$ ), а также в ограждении здания при  $z = 24$  час (86400 с) стремится к единице:

$$\cos(\omega\tau - kx) = 1,$$

а уравнение (11) для температурной волны примет вид:

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{II}^{max} \cdot e^{-k_T x}. \quad (22)$$

Для звуковой волны, звуковое давление в материале  $P_{x,\tau}$  также зависит от звукового давления на поверхности  $P_m^{max}$  и имеет вид:

$$P_{x,\tau} = P_m^{max} \cdot e^{-k_A x}. \quad (23)$$

Полученные уравнения температурной волны (22) и звуковой волны (23) позволяют определить глубину и долю проникновения температурных и звуковых волн в изделия (пластине или ограждении здания).

### *Выводы по 3.1*

1. Впервые получена зависимость теплопроводности и волнового числа в пластине при наступлении стационарного теплового режима (20) и (20 а), а также для стенки ограждения здания за период 24 часа (21), (21 а).

2. Впервые получена формула (20 б) для определения времени наступления стационарного теплового режима в пластине по волновому числу.

### 3.2 Доля проникновения температурных и звуковых волн

Гармонические колебания температурных и звуковых (акустических) волн считаются затухшими, если максимальное избыточное значение температуры  $\vartheta_{x=\delta}^{max}$  или звукового давления  $P_{x=\delta}^{max}$  на внутренней поверхности пластины или ограждения здания, то есть на глубине  $x = \delta$ , составляет какую-то долю  $\theta$  (или проценты) от максимальной избыточной температуры  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  или максимально избыточного давления звуковой волны  $P_m^{max}$  на наружной поверхности пластины или ограждения здания, то есть:

$$\frac{\vartheta_{x=\delta}^{max}}{\vartheta_{\Pi}^{max}} = \theta_T, \quad (24 \text{ а})$$

$$\frac{P_{x=\delta}^{max}}{P_m^{max}} = \theta_A. \quad (24 \text{ б})$$

Согласно, полученных уравнений (22) и (24 а), а также (23) и (24 б) можно записать для температурной и звуковой волны соответственно:

$$\frac{\vartheta_{x=\delta}^{max}}{\vartheta_{\Pi}^{max}} = e^{-k_T x} = \theta_T, \quad (25 \text{ а})$$

$$\frac{P_{x=\delta}^{max}}{P_m^{max}} = e^{-k_A x} = \theta_A. \quad (25 \text{ б})$$

Так как гармонические колебания температурных и звуковых волн имеют подобные уравнения (22) и (23), но с различием волновых коэффициентов  $k_T$  и  $k_A$ , то и доля проникновения будет иметь подобный или общий вид, а именно:

$$\theta_T = \theta_A = \theta.$$

Сопоставляя последнее соотношение, уравнение (25 а) и (25 б) видно, что более удобное уравнение для расчетов имеет вид:

$$e^{-kx} = \theta, \text{ или } e^{kx} = \theta^{-1}. \quad (26)$$

Выберем несколько соотношений безразмерных относительных температур  $\theta_T$  и относительных звуковых давлений  $\theta_A$ , а именно долю проникновения волн  $\theta$ :

$$\theta = 0,75 (75 \%); 0,5 (50 \%); 0,25 (25 \%); 0,1 (10 \%); 0,01 (1 \%).$$

То есть, доли соотношений или доли проникновения температурных или акустических волн (гармонических колебаний) имеют вид:



$$\theta = 0,75; 0,5; 0,25; 10^{-1}; 10^{-2}. \quad (27)$$

Полученное соотношение можно записать и в виде:

$$\theta^{-1} = 1/0,75; 1/0,5; 1/0,25; 1/10^{-1}; 1/10^{-2};$$

или в виде:

$$\theta^{-1} = 1,33; 2; 4; 10^1; 10^2. \quad (27 \text{ а})$$

Обозначим комплекс  $(k \cdot x) = H$  (безразмерное число), и проведем последовательно расчеты соответственно для долей проникновения гармонических колебаний. Кроме того введем обозначение:  $\lg e = M = 0,43429 \approx 0,434$ .

**А)** Доля проникновения гармонических колебаний равна 0,75 или 75%, тогда согласно (27) и (27 а) имеем  $\theta = 0,75$ , или  $\theta^{-1} = 1,33$  или согласно (26):

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 1,33.$$

Прологарифмировав левую и правую часть полученного соотношения получим:

$$(k \cdot x) \cdot \lg e = \lg 1,33$$

или с учетом принятых обозначений:

$$(k \cdot x) = H; \lg e = M = 0,43429 \approx 0,434, \text{ а логарифм } \lg 1,33 = 0,125,$$

$$\text{или: } H = (k \cdot x) = \lg 1,33 / \lg e = 0,125 / M = 0,125 / 0,434 = 0,29 \approx 0,3. \quad (28 \text{ а})$$

То есть, при  $\theta = 0,75$  имеем слой 75 % проникновения и 25 % поглощения гармонических колебаний, а комплекс  $H = 0,29$  (или  $H \approx 0,3$ ).

**Б)** Доля проникновения гармонических колебаний равна 0,5 или 50%, тогда согласно (27) и (27 а) имеем  $\theta = 0,5$ , или  $\theta^{-1} = 2$ , или согласно (26):

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 2.$$

Прологарифмировав левую и правую часть полученного соотношения получим:

$$(k \cdot x) \cdot \lg e = \lg 2,$$

или с учетом принятых обозначений:

$$(k \cdot x) = H, \text{ а также } \lg e = M = 0,43429 \approx 0,434, \text{ а логарифм } \lg 2 = 0,3,$$

имеем:  $H = (k \cdot x) = \lg 2 / \lg e = \lg 2 / M = 0,3 / 0,434 = 0,69 \approx 0,7$  (28 б)

То есть, при  $\theta = 0,5$  имеем слой 50 % проникновения и 50 % поглощения гармонических колебаний (слой половинного поглощения и половинного проникновения) и комплекс  $H = 0,69$  (или  $H \approx 0,7$ ).

**В)** Доля проникновения гармонических колебаний равна 0,25 или 25%, тогда согласно (27) и (27 а) имеем  $\theta = 0,25$ , или  $\theta^{-1} = 4$ , или согласно (26):

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 4.$$

После логарифмирования получим:

$$(k \cdot x) \cdot \lg e = \lg 4 = 0,602, \text{ или}$$

$$H \cdot M = 0,602, \text{ а соответственно:}$$

$$H = 0,602 / 0,434 = 1,387 = 1,39 \approx 1,4. \quad (28 в)$$

То есть, при  $\theta = 0,25$  имеем слой 25 % проникновения и 75 % поглощения гармонических колебаний, а комплекс  $H = 1,39$  (или  $H \approx 1,4$ ).

**Г)** Доля проникновения гармонических колебаний равна 0,1 или 10%, тогда согласно (27) и (27 а) имеем  $\theta = 0,1$ , или  $\theta^{-1} = 10$ , или согласно (26):

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 10.$$

После логарифмирования получим:

$$(k \cdot x) \cdot \lg e = \lg 10 = 1, \text{ или}$$

$$H \cdot M = 1, \text{ а соответственно:}$$

$$H = 1 / 0,434 = 2,3. \quad (28 г)$$

То есть, при  $\theta = 0,1$  имеем слой 10 % проникновения и 90 % поглощения гармонических колебаний, а комплекс  $H = 2,3$ .

**Д)** Доля проникновения гармонических колебаний равна 0,01 или 1%, тогда согласно (27) и (27 а) имеем  $\theta = 0,01$ , или  $\theta^{-1} = 10^2$ , или согласно (26):

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 10^2.$$

После логарифмирования получим:

$$(k \cdot x) \cdot \lg e = 2 \cdot \lg 10 = 2, \text{ или}$$

$H \cdot M = 2$ , а соответственно:

$$H = 2/0,434 = 4,608 = 4,61 \approx 4,6. \quad (28 \text{ д})$$

То есть, при  $\theta = 0,01$  имеем слой 1 % проникновения и 99 % поглощения гармонических колебаний, а комплекс  $H = 4,61$  (или  $H \approx 4,6$ ).

В результате расчетов и математического эксперимента получена система равенств 28 (а, б, в, г, д) по доле проникновения и доле поглощения температурных и звуковых волн в материале пластине, ограждении зданий и сооружений, а именно система равенств (28):

А) при  $\theta = 0,75$  (75 %),  $H = kx = 0,29 \approx 0,3$ ;

Б) при  $\theta = 0,5$  (50 %),  $H = kx = 0,69 \approx 0,7$ ;

В) при  $\theta = 0,25$  (25%),  $H = kx = 1,39$  (1,387)  $\approx 1,4$ ;

Г) при  $\theta = 10^{-1}$  (10 %),  $H = kx = 2,3$ ;

Д) при  $\theta = 10^{-2}$  (1 %),  $H = kx = 4,61 \approx 4,6$ ;

Для подтверждения полученных выражений, отметим, что еще в 1729 году Пьер Бугер в законе затухания плоских волн (закон П. Бугера), установил, что линейный коэффициент половинного поглощения волн  $kx = 0,69$ , что подтверждает проведенный математический эксперимент.

Проведенный математический эксперимент по определению доли проникновения температурных и звуковых (акустических) волн определяет методику расчета волнового числа в пластине, ограждении при любой доле проникновения гармонических колебаний.

*Методика расчета волнового числа по температурам тела.*

Вначале определяется доля проникновения гармонических колебаний  $\theta_T$  для любого отсчета времени ( $\tau$ ) и замеренным значениям температур тела  $T_0$ ,  $T_{П1}$ ,  $T_{П2}$ , согласно (рис. 1), а также соотношения (25а), и численно равна:

$$\theta_T = (T_{П2} - T_0)/(T_{П1} - T_0) = \vartheta_{П2}/\vartheta_{П1}.$$

То есть, допустим, что после определения доли проникновения гармонических колебаний она составит  $\theta_*$  или  $\theta^{-1} = 1/\theta_*$ . Тогда согласно (26):

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 1/\theta_*.$$

Прологарифмировав левую и правую часть полученного соотношения, получим, что при условии  $x = \delta$ :  $(k \cdot \delta) \cdot \lg e = \lg (1/\theta_*)$ .

Так как:  $H = (k \cdot \delta)$ ,  $M = \lg e = 0,434$ , то:  $(H \cdot M) = \lg (1/\theta_*)$ .

Тогда безразмерное волновое число  $H$ :

$$H = \lg(1/\theta_*) / (\lg e) = \lg(1/\theta_*) / (0,434).$$

Согласно приведенной методике волновое число в пластине, для конкретного времени  $\tau$  нагрева (или охлаждения) определяется по ф-ле:

$$k_T^{nl} = H/\delta = \lg(1/\theta_*) / (0,434 \cdot \delta). \quad (29)$$

Полученная методика имеет огромное значение для экспериментальных исследований и определения ТЗФС веществ, а также для определения глубины проникновения гармонических колебаний.

Если глубину проникновения гармонических колебаний обозначить  $L$  ( $x = L$ ), то общее выражение глубины проникновения волн имеет вид:

$$L = H/k.$$

Глубина проникновения температурных волн соответственно равна:

$$L_T = H_T/k_T, \quad (29 \text{ а})$$

а глубина проникновения звуковых (акустических) волн составляет:

$$L_A = H_A/k_A. \quad (29 \text{ б})$$

Волновое число  $k$ , входящее в структуру (29 а) и (29 б), согласно (18) для температурной волны  $k_T$ , а также согласно (19) и (19 а) для звуковой (акустической) волны  $k_A$  соответственно будут равны:

$$k_T = \sqrt{\omega_T/2a}, \text{ м}^{-1},$$

$$k_A = \omega_A/C_A, \text{ м}^{-1}, \quad \text{или} \quad k_A = (2\pi f)/C_A, \text{ м}^{-1}.$$

Ранее установлено, что волновое число для пластины в момент наступления стационарного или стадии упорядоченного теплового режима ( $\tau_*$ ), согласно выражения (20) равно:

$$k_T^{nl} = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_*)}, \text{ м}^{-1},$$

а волновое число для стенки ограждения здания за (сутки) период  $z = 24$  час, согласно (21) равно:

$$k_T^{ct} = \sqrt{\pi/(a \cdot z)}, \text{ м}^{-1},$$

где  $a$  — температуропроводность материала,  $\text{м}^2/\text{с}$

Тогда соответственно, глубина проникновения температурных волн  $L_T$  (м) для пластины в момент наступления стационарного (т.е. при  $\tau_*$ ) и упорядоченного теплового режима, согласно выражения (20) и (29 а) равно:

$$L_T = H_T/k_T^{nl} = H_T \cdot \sqrt{(2a \cdot \tau_*)/\pi}, \text{ (м)}. \quad (30)$$

Соответственно, глубина проникновения температурных волн  $L_T$  (м) в стенке ограждения здания за сутки или период колебания температур на наружной поверхности ограждения  $z = 24$  час, согласно (21) и (29 а) равно:

$$L_T = H_T / k_T^{CT} = H_T \cdot \sqrt{(a \cdot z) / \pi}, \text{ (м)}. \quad (31)$$

Глубина же проникновения звуковых (акустических) волн зависит от частоты колебаний звуковой волны  $f$  ( $\text{с}^{-1}$ ) и согласно (19 а) и (29 б) составляет:

$$L_A = H_A / k_A = (H_A \cdot C_A) / (2\pi f), \text{ (м)}. \quad (32)$$

Тепло-звуковая аналогия по глубине и доле проникновения гармонических колебаний и соотношений (30), (31) и (32) позволяют также определять с какой частотой звука  $f_*$  и долей проникновения волн  $H_A$ , звуковая волна проникает на заданную глубину  $L_A$ , а именно:

$$f_* = (H_A \cdot C_A) / (2\pi \cdot L_A), \text{ (с}^{-1}\text{)}. \quad (33)$$

То есть, звуковая (акустическая) волна с частотой меньше  $f_*$  будет проникать или проходить через стену ограждения (пластины) толщиной  $L_A$ , а с частотой более  $f_*$  — будет поглощаться материалом перегородки стены, ограждения (пластины).

Тепло-звуковая аналогия и математический эксперимент позволяют сформулировать выводы по глубине проникновения температурных и звуковых волн. Математический эксперимент по тепло-звуковой аналогии и глубине проникновения температурной волны в дальнейшем (ниже в разд. 3.4) позволяет также определять:

- коэффициент звукопроводности и теплопроводности,
- звукоизоляцию и термоизоляцию в децибелах.

### *Выводы по 3.2*

1. Впервые установлено, что глубина проникновения температурной волны  $L_T$  прямо пропорционально теплопроводности вещества  $a$  и периоду колебаний волны  $z$  (30) и (31).

2. Глубина проникновения звуковой (акустической) волны  $L_A$  прямо пропорционально скорости звука  $C$  и обратно пропорционально частоте звуковых колебаний  $f$  (32).

3. Тепло-звуковая аналогия позволяет определять с какой частотой звука  $f_*$  и долей проникновения волн  $H_A$ , звуковая волна проникает на заданную глубину  $L_A$  пластины или ограждения зданий (33).

4. Очевидно, что волновое число  $k$  и доля проникновения  $\theta$  обратно пропорциональны, т.е.: чем больше волновое число  $k$ , и соответственно больше комплекс  $H$ , тем меньше доля проникновения и больше доля поглощения волн (28).

5. Чем больше плотность материала и объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), тем больше поглощение и меньше проникновение волн, больше волновое число  $k$  и наоборот.

6. Разработана методика определения волнового числа в пластине при любой доле проникновения гармонических колебаний, что имеет огромное практическое значение для экспериментальных исследований.

### 3.3 Тепловое прослушивание тел и оценка наступления упорядоченного теплового режима

Для экспериментального определения ТЗФС материалов кроме пластины, часто используют и другие образцы (геометрические фигуры) выполненные в виде цилиндра, призмы квадратного сечения, куба и шара. Все эти геометрические фигуры — образцы используют как для физического, так и для математического эксперимента.

При симметричном нагреве (охлаждении) геометрических фигур необходимо иметь уверенность в том, что упорядоченный тепловой режим уже наступил. Поэтому оценкой начала наступления упорядоченной части процесса нагрева (охлаждения) должна служить доля проникновения температурной волны:

$$\theta_T = (T_{Ц} - T_0)/(T_{П} - T_0), \quad (34)$$

$$\theta_T = 0,2 \xi. \quad (34 \text{ а})$$

где:  $T_{Ц}$ ,  $T_{П}$ ,  $T_0$  — соответственно температура центра, поверхности тела и начальная температура, °С.

Параметр  $\xi$  равен: 1; 2; 2,2; 2,5; 3 — соответственно для пластины, цилиндра, призмы квадратного сечения, куба и шара. Напомним, что все эти геометрические фигуры используют в качестве образцов для экспериментального определения ТЗФС материалов.

Полученные закономерности (34) и (34 а) являются универсальными, то есть могут быть использованы при любых граничных условиях и при бесконечно большой интенсивности процесса теплообмена на границе тела. Математический анализ значений  $\theta_T$  и способ оценки приближений [58] приводят к заключению, что для условий нагрева или охлаждения тел (геометрических фигур), конвективным, лучистым, суммарным потоком теплоты, зависимости

(34) и (34 а) гарантируют наступление упорядоченного периода нагрева (охлаждения) с погрешностью в 1 %.

Используя методику расчета волнового числа (разд. 3.2) именно для тел различной формы, вначале определяется безразмерное волновое число  $H_T$ , а затем и волновое число температурной волны в теле, для конкретного времени  $\tau$  нагрева (или охлаждения), по формуле (29):  $k_T = H_T/\delta_*$ . Толщина  $\delta_*$  при симметричном нагреве тел, соответствует расстоянию между точками измерения температур центра и поверхности. Математический эксперимент при симметричном нагреве (охлаждении) тел различной формы, согласно (34 а), позволяет получить следующие цифровые значения:

— пластина:  $\theta_T = 0,2 \cdot \xi = 0,2 \cdot 1 = 0,2$ ;  $H_T = 1,61$ ;

— цилиндр:  $\theta_T = 0,2 \cdot 2 = 0,4$ ;  $H_T = 0,917$ ;

— призма квадратного сечения:  $\theta_T = 0,2 \cdot 2,2 = 0,44$ ;  $H_T = 0,82$ ;

— куб:  $\theta_T = 0,2 \cdot 2,5 = 0,5$ ;  $H_T = 0,69$ ;

— шар:  $\theta_T = 0,2 \cdot 3 = 0,6$ ;  $H_T = 0,51$ .

Для экспериментального определения ТЗФС материалов и веществ часто используют несимметричный нагрев (охлаждение) пластины. При несимметричном теплообмене пластина с одной поверхности нагревается тепловым потоком с любыми граничными условиями (1, 2, 3 или 4 рода), а с противоположной стороны пластина охлаждается с граничными условиями 3 рода (суммарным тепловым потоком) или 4 рода (условия сопряжения).

При несимметричном нагреве (охлаждении) пластины с начальной температурой  $T_0$ , и когда на поверхностях пластины  $T_{П1}$  и  $T_{П2}$  заданы разные условия однозначности (граничные, начальные), оценкой начала наступления упорядоченной части процесса нагрева (охлаждения) служит соотношение, которое гарантирует долю проникновения температурной волны с погрешностью в 1 %:

$$\theta_T = (T_{П2} - T_0)/(T_{П1} - T_0), \quad (34 б)$$

$$\theta_T = 0,243 \quad H_T = 1,414. \quad (34 в)$$

Важно отметить, что температурное поле, возникающее в процессе нагрева или охлаждения таких тел, как призма квадратного сечения и куб, может быть скоординировано распределением температур по температурам на их поверхностях [18, 58].

Смысл метода теплового прослушивания тел заключается в том, что при охлаждении (или нагреве) призмы квадратного сечения или куба, температура

их центра может координироваться температурами центра грани и середины ребра. Это означает, что температуру центра призмы квадратного сечения или куба можно определить по поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра, не проникая с термопарой внутрь объема и не нарушая их целостность. При этом нет необходимости знать такие теплофизические характеристики вещества, как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, плотность.

Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра призмы квадратного сечения или центра куба  $T_{Ц.пр.}$  по формуле:

$$\text{— при нагреве: } T_{Ц.пр.} = T_C - [(T_C - T_{ГР})^2 / (T_C - T_P)], \quad (35 \text{ а})$$

$$\text{— при охлаждении: } T_{Ц.пр.} = T_C + [(T_{ГР} - T_C)^2 / (T_P - T_C)], \quad (35 \text{ б})$$

где:  $T_C, T_{ГР}, T_P$  — соответственно температура среды (нагрева или охлаждения), центра поверхности грани, середины ребра.

Полученные закономерности (35 а) и (35 б) являются универсальными, то есть могут быть использованы при любых граничных условиях и при бесконечно большой интенсивности процесса теплообмена на границе тела. Математический анализ значений  $T_{Ц.пр.}$  приводят к заключению, что метод теплового прослушивания позволяет определять температуру центра призмы квадратного сечения или центра куба только по экспериментальным поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра. Метод исключает влияние внешних условий, не нарушает целостность образца и требует незначительного времени эксперимента. Причем при нагреве или охлаждении тел нет необходимости знать значения критерия Фурье, другие теплофизические свойства вещества, а также проникать с термопарой в центральную часть объема тела.

Имея такие исходные данные, наступление упорядоченного теплового режима при несимметричном нагреве (охлаждении) пластины любым способом, а также при симметричном нагреве (охлаждении) и других геометрических фигур (призма, куб), может быть установлено по температурам на поверхностях, центра и начальной температуре изделия или исследуемого образца по формулам (34), (34 а) и (34 б).

### *Выводы по 3.3*

1. Установлены закономерности (34), (34 а), (34 б) которые являются универсальными для оценки начала упорядоченной части процесса симметричного нагрева (охлаждения), то есть могут быть использованы при любых граничных условиях и при любой интенсивности процесса теплообмена на границе тел различной формы. Закономерности гарантируют наступление



начала упорядоченного теплового периода нагрева с погрешностью в 1 %. Параметр  $\xi$  равен: 1; 2; 2,2; 2,5; 3 — соответственно для пластины, цилиндра, призмы квадратного сечения, куба и шара.

2. Установлена закономерность (34 в) для оценки начала упорядоченной части процесса несимметричного нагрева (охлаждения) пластины.

3. Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра призмы квадратного сечения (35 а) или куба (35 б) по поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра, не проникая с термопарой внутрь их объема и не нарушая их целостность. При этом нет необходимости знать такие теплофизические характеристики вещества, как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, плотность. Причем при нагреве или охлаждении тел нет необходимости знать значения критерия Фурье, а также проникать с термопарой в центральную часть объема тела.

### 3.4 Звукопроводность и термопроводность.

#### Звукоизоляция и термоизоляция

В разделе 3.2 было установлено, что безразмерный коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  — характеризует долю отношения прошедшей через пластину (перегородку, стену) энергии звуковой волны, к энергии падающей или отношению интенсивности прошедшей (пропущенной) звуковой волны  $J_{\text{пр}}$  к интенсивности падающей волны  $J_{\text{пад}}$ , т.е.:

$$\alpha_{\text{пр}} = J_{\text{пр}}/J_{\text{пад}}.$$

Сравнивая полученное определение  $\alpha_{\text{пр}}$  и соотношение (25) можно заключить, что коэффициент звукопроводности численно равен доле проникновения звуковой волны, т.е.:

$$\alpha_{\text{пр}} = \theta_A.$$

Предположим, что пластина, перегородка или стена ограждения толщиной  $x = \delta$  (м) подвержена воздействию звуковой (акустической) волны со скоростью звука в материале  $C_A$  (м/с), но при определенной или заданной частоте звука  $f$  (с<sup>-1</sup>).

Тогда частота колебаний  $\omega_A$  и волновое акустическое число  $k_A$  определяются по известным формулам (15), (19), (19 а):

$$\omega_A = 2\pi f, \text{ с}^{-1}; \quad k_A = \omega_A/C_A, \text{ м}^{-1} \quad \text{или} \quad k_A = (2\pi f)/C_A, \text{ м}^{-1}.$$

Согласно выражения (26):  $e^{-kx} = \theta$ , а  $x = \delta$ , тогда можно записать:

$$\theta_A = e^{-k_A \cdot \delta}. \quad (36)$$

Прологарифмировав последнее равенство, получим

$$\lg \theta_A = \lg (e^{-k_A \cdot \delta}) = (-k_A \cdot \delta) \lg e = (-k_A \cdot \delta) M = -0,434 (k_A \cdot \delta).$$

Тогда доля проникновения звуковых волн

$$\theta_A = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}. \quad (36 \text{ а})$$

Следовательно, звукопроводность при определенной частоте  $f$ , толщине изделия  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , определяется из выражения:

$$\alpha_{\text{пр}} = \theta_A = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}. \quad (37)$$

Звукоизоляция пластины, перегородки, стены определяется в децибелах по формуле:

$$R_W = 10 \lg (1/\alpha_{\text{пр}}) = 4,34 (k_A \cdot \delta), \text{ дБ}. \quad (38)$$

Для звуковой волны образующей шума или набор частот непрерывно заполняющих интервал или сплошной спектр частот, звукоизоляция определяется экспериментально либо в экспериментальной установке [2, 13, 26], либо в реальных условиях здания или перегородки методом неразрушающего контроля. Для этого необходимо создать условия шума с одной стороны перегородки до такого состояния, что бы зафиксировать шумомером с другой стороны перегородки значения шума в децибелах. Генератором шума может служить звуковая колонка, а шумомер типа СМ – 01В Contact Mikrofon. Для определения звукоизоляции перегородки требуется значение уровня звукового давления в децибелах до перегородки  $\Lambda_{\text{пад}}$  и после прохождения  $\Lambda_{\text{пр}}$ , а именно:

$$R_W = \Lambda_{\text{пад}} - \Lambda_{\text{пр}}, \text{ дБ}.$$

Звукопроводность шума для перегородки, стены имеет вид:

$$\alpha_{\text{пр}} = 10^{-0,1R_W}. \quad (39)$$

*Определение и понятия теплопроводности и термоизоляции*

Определение теплопроводности и термоизоляции вводятся впервые.

Теплопроводность — это безразмерный коэффициент, который характеризует долю отношения прошедшей через стену (пластину, перегородку) энергии температурной волны (Дж), к энергии, подведенной к стенке и определяется аналогично акустической волны (37):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-M \cdot k_T \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_T \cdot \delta} . \quad (40)$$

где  $k_T$  — волновое температурное число, определяемое для пластины в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ) по формуле (20), а для ограждения здания за период 24 час, по формуле (21).

Термоизоляция стены, перегородки, пластины определяется в децибелах по формуле:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ТЕРМ}}), \text{ дБ.} \quad (41)$$

Если же, наоборот, известна термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , то термопроводность, согласно (39), определится по формуле:

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}}. \quad (42)$$

Сопоставив соотношения (40) и (42) можно установить равенство:

$$-(M \cdot k_T \cdot \delta) = -0,1 R_{\text{ТЕРМ}}, \text{ или } 4,34 (k_T \cdot \delta) = R_{\text{ТЕРМ}},$$

или полученное равенство можно записать в виде:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T \cdot \delta), \text{ дБ, или: } k_T = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot \delta), \text{ м}^{-1}. \quad (43)$$

Соотношения по термоизоляции (43) получены впервые и позволяют определять термоизоляцию  $R_{\text{ТЕРМ}}$  или волновое температурное число  $k_T$  в пластине или стене ограждения здания.

Тепло-звуковая аналогия и математический эксперимент позволяют сформулировать выводы по «звукопроводности и термопроводности, звукоизоляции и термоизоляции».

### *Выводы по 3.4*

1. Безразмерный коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  характеризует долю отношения прошедшей через пластину (перегородку, стену) энергии звуковой волны, к энергии падающей звуковой волны на наружную поверхность ограждения (пластины, перегородки) и зависит от толщины ограждения  $\delta$ , скорости звука  $C_A$  и частоты звуковых колебаний  $f$ .

2. Коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  меньше, и следовательно более эффективней, с увеличением толщины ограждения (пластины)  $\delta$ , уменьшением скорости звука  $C_A$  и увеличением частоты звуковых колебаний  $f$ .

3. С уменьшением коэффициента звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  звукоизоляция  $R_W$  (в децибелах) увеличивается, и будет считаться (становится) более энергоэффективной (например, в процессе производства звукоизоляции) или более энергоэффективной (в процессе эксплуатации).

4. Безразмерный коэффициент теплопроводности  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  характеризует долю отношения прошедшей через стену (пластину, перегородку) энергии температурной волны (Дж), к энергии, поступающей на наружную поверхность ограждения (пластины) и зависит от толщины ограждения  $\delta$ , а также от волнового температурного числа  $k_T$  в пластине или стене ограждения здания.

5. Волновое температурное число  $k_T^{\text{СТ}}$  в стене ограждения здания, зависит от теплопроводности вещества  $a$  (21) и от периода колебаний температурной волны  $z$ . Волновое температурное число  $k_T^{\text{ПЛ}}$  в пластине, зависит от теплопроводности вещества  $a$  (20) и времени наступления стационарного теплового режима  $\tau_*$ .

6. Теплопроводность  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  становится меньше, и следовательно более эффективней, с увеличением толщины  $\delta$  пластины (ограждения), уменьшением теплопроводности вещества  $a$ .

7. С уменьшением теплопроводности  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$ , термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (в децибелах) увеличивается и будет считаться (становится) более энергоэффективной (например, в процессе производства термоизоляции) или более энергоэффективной (в процессе эксплуатации).

8. При одинаковой толщине пластины  $\delta$  и теплопроводности  $a$ , звукоизоляция  $R_W$  зависит от частоты звуковых колебаний  $f$ , а термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  — от времени наступления стационарного теплового режима  $\tau_*$  в пластине или периода колебаний температурной волны  $z$  в стене ограждения здания.

9. Впервые установлены соотношения (43), которые позволяют определять термоизоляцию  $R_{\text{ТЕРМ}}$  или волновое температурное число  $k_T$  в пластине или стене ограждения здания, а также установить, что термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  более эффективна при большей толщине пластины  $\delta$  и меньшей теплопроводности вещества  $a$ .

10. Любой избыточный температурный потенциал пластины, ограждения здания, изделия в течение времени выравнивается и приводит к термодинамическому равновесию тела, снижает волновое число  $k_T$ , и следовательно снижается термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ .

### **3.5 Плотность теплового потока на поверхности тел, волновое число, коэффициент теплоусвоения**

Многие явления природы подчиняются закону простого гармонического колебания. Только периоды таких колебаний для разных условий могут быть различными. Так период наиболее резких колебаний температуры Земли равен одному году, а для ограждений жилого помещения он составляет одни сутки.

Температурные колебания распространяются по закону косинуса и легко создаются в лабораторных условиях, что позволяет определить объемную теплоемкость ( $c\rho$ ), температуропроводность  $a$  и теплопроводность  $\lambda$  материалов, изделий и ограждений. Если процесс теплового колебания изделия (ограждения) продолжается достаточно долго, то начальные условия не будут сказываться на распространении температуры, а явление распространения температурных волн описывается двумя уравнениями.

Согласно закономерностям: закона теплопроводности Фурье (3), а также избыточной температуре (10) на наружной поверхности пластины или ограждения здания (рис. 3.1), при  $x = 0$ :

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}, \quad (44 \text{ а})$$

$$\vartheta_{0,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{max} \cdot \cos(\omega\tau), \quad (44 \text{ б})$$

где  $a$  — температуропроводность материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда колебаний избыточной температуры на поверхности изделия (максимальное отклонение температуры на поверхности изделия от средней температуры материала, массива),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\omega = 2\pi/z$  — угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в пластине или в ограждении здания  $1/\text{с}$ ;  $z$  — полный период колебаний.

Решение системы уравнений (44а) и (44б) примет вид:

$$\vartheta_{x,\tau} = \vartheta_{\Pi}^{max} \cdot \cos(\omega\tau - kx) e^{-kx}, \quad (44 \text{ в})$$

где  $k$  — волновое число,  $1/\text{м}$ ;  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда колебаний температурной (или акустической) волны на поверхности пластины со стороны нагревателя или на наружной поверхности ограждения здания,  $^{\circ}\text{C}$ .

Из решения (44в) вытекает ряд зависимостей, которые часто используются в технических расчетах. Так плотность теплового потока на поверхности тела может быть найдена с помощью выражения (44в) и имеет вид:

$$q_{\Pi,\tau} = \lambda \cdot k_{\tau} \sqrt{2} \cdot \vartheta_{\Pi}^{max} \cdot \cos\left(\omega\tau + \frac{\pi}{4}\right). \quad (44 \text{ г})$$

Как известно, волновое число  $k_{\tau}$  для температурной волны согласно выражения (18) равно:

$$k_{\tau} = \sqrt{\omega_{\tau}/2a}, \text{ м}^{-1},$$

где  $a$  — температуропроводность:  $a = \lambda/(c\rho)$ .

Подставив  $k_T$  и  $a$  в уравнение (44 г), получим:

$$q_{\Pi, \tau} = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)} \cdot \omega_T \cdot \vartheta_{\Pi}^{max} \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right). \quad (44 \text{ д})$$

Период колебаний температурной волны на наружной поверхности ограждения здания или полный цикл, это цикл одни сутки ( $z = 24$  час).

Период колебаний температурной полуволны на наружной поверхности пластины при нагреве (охлаждении), равен времени наступления стационарного  $\tau_*$  или упорядоченного теплового режима. Тогда при этих условиях косинусоида температурной волны:  $\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$ , в выражении (44 г) и (44 д) будет приближаться или равна единице:  $\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) = 1$ .

Исходя из этого, общее выражение максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины или ограждении здания будет иметь вид:

$$q_{\Pi}^{max} = \sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T \cdot \vartheta_{\Pi}^{max}, \text{ или} \quad (45 \text{ а})$$

$$q_{\Pi}^{max} = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)} \cdot \omega_T \cdot \vartheta_{\Pi}^{max}, \text{ или} \quad (45 \text{ б})$$

$$q_{\Pi}^{max} = B \cdot \vartheta_{\Pi}^{max}, \text{ Вт/м}^2. \quad (46)$$

где  $B$  — коэффициент теплоусвоения, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда колебаний температурной волны на поверхности пластины со стороны нагревателя или на наружной поверхности ограждения здания, °С.

В процессе распространения температурных волн в пластине или в ограждении здания, коэффициент теплоусвоения  $B$  для любого определенного промежутка времени или цикла  $z$  численно равен:

$$B = q_{\Pi}^{max} / \vartheta_{\Pi}^{max} \text{ или} \quad (47)$$

$$B = q_{\Pi, \tau} / \vartheta_{\Pi, \tau}. \quad (47 \text{ а})$$

Распределение избыточных температур в пластине или в ограждении здания по толщине  $\delta$ , осуществляется в зависимости от способа нагрева или охлаждения, а по времени — от начального, а затем и упорядоченного теплового режима, до стационарного теплового режима.

В ограждении здания, при циклическом подводе теплоты к наружной поверхности материала (массива), то есть при тепловых колебаниях в течение суток, коэффициент теплоусвоения — это отношение максимальной интенсивности или плотности теплового потока на поверхности ограждения  $q_{\Pi}^{max}$  к максимальной амплитуде колебаний температурной (или акустической) волны на наружной поверхности ограждения здания в течение суток.

Коэффициент теплоусвоения  $B$  характеризует теплоаккумулирующую способность всего объема материала (стены, пластины) через который проходит температурная волна, а в процессе распространения температурных волн в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима в пластине, остается постоянным и согласно (45 а) и (45 б) определяется одним из соотношений:

$$B = \sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T = 1,414 \cdot \lambda \cdot k_T \approx 1,41 \cdot \lambda \cdot k_T, \text{ или} \quad (48 \text{ а})$$

$$B = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho) \cdot \omega_T}, \text{ или} \quad (48 \text{ б})$$

$$B = (c\rho) \sqrt{a \cdot \omega_T}. \quad (48 \text{ в})$$

где  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К),  $(c\rho)$  — объемная теплоемкость материала, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $\omega_T = 2\pi/z$  — угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в пластине или в ограждении здания 1/с;  $z$  — полный период колебаний;  $a$  — температуропроводность, м<sup>2</sup>/с.

С экологической точки зрения ограждений более благоприятными являются строительные и теплоизоляционные материалы, обладающие более высокими значениями коэффициента теплоусвоения. В этом случае колебания мощности нагревательных приборов будут в какой-то степени компенсироваться накоплением и расходом тепловой энергии, а температура окружающего воздуха будет более равномерной во времени.

В выражении (48 в) температуропроводность вещества характеризует меру тепловой инерции материала. При распространении теплоты в материале, веществе, изделии, образце любой формы, температуропроводность служит важнейшей теплофизической характеристикой, определяющей теплоусвоение, тепловую активность и тепловую инерцию любого массива.

При увеличении значений объемной теплоемкости  $(c\rho)$  температуропроводность  $a$  уменьшается и это означает большое накопление теплоты в материале за период нагрева и неглубокое проникновение температурных волн, а при малых значениях  $(c\rho)$  — наоборот.

Интенсивность теплоты или плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания или на поверхности пластины со стороны нагревателя в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима, в определенный промежуток времени  $\tau$  будет иметь общий вид:

$$q_{п,\tau} = B \cdot \vartheta_{п,\tau}. \quad (48 \text{ д})$$

В работе рассмотрены некоторые варианты исследования ТЗФС тел.

Вариант А. Ограждение здания или перегородка (рис. 3.3).

Коэффициент теплоусвоения  $B$  определяется только при максимальной плотности теплового потока на поверхности ограждения по формуле (47):

$$B = q_{\Pi}^{max} / \vartheta_{\Pi}^{max}.$$

В количественном смысле коэффициент теплоусвоения в ограждении здания при суточных колебаниях на поверхности ( $z = 24$  час) — это отношение максимального теплового потока на наружной поверхности  $q_{\Pi}^{max}$  к максимальной амплитуде колебаний температурной волны на наружной поверхности стены  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  в течение суток.

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны за сутки определяется только на наружной поверхности ограждения, согласно (12 а):

$$\vartheta_{\Pi}^{max} = 0,5 (T_{\Pi 1}^{max} - T_{\Pi 1}^{min}).$$

Частота колебаний температурной волны на наружной поверхности ограждения здания за сутки  $z$ , согласно (17) равна:

$$\omega_T^{CT} = 2\pi/z = 2\pi/86400, 1/c,$$

где 86400 с — время цикла за сутки (24 час).

Теплопроводность определяется в стадии максимального теплового потока на поверхностях ограждения за сутки по формуле (13):

$$\lambda = (q_{\Pi 1}^{max} \cdot \delta_{CT}) / \Delta T_{CT} = (q_{\Pi 1}^{max} \cdot \delta_{CT}) / (T_{ВН} - T_{НАР}), \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

где  $\Delta T_{CT}$  — максимальная разность температур стены между внутренней  $T_{ВН}$  и наружной  $T_{НАР}$  температурами ограждения здания в момент максимального теплового потока  $q_{\Pi 1}^{max}$  (обычно в ночные часы) или близкого ко времени максимального теплового потока (в жаркий летний период в дневные часы).

Волновое число для стенки ограждения здания за период  $z = 24$  час, согласно (21), будет иметь вид:

$$k_T^{CT} = \sqrt{\pi/(a \cdot z)}, \text{ м}^{-1}.$$

Если будет известно волновое число для стенки ограждения здания  $k_T^{CT}$  за период 24 час, то полученное уравнение (21) позволяет определить теплопроводность ограждения здания (21 а), а именно:

$$a = \pi/[z (k_T^{CT})^2] = \pi/[86400 (k_T^{CT})^2], \text{ м}^2/\text{с}.$$

Объемная теплоемкость ограждения здания, согласно (48 б) и (48 в), может быть определена по формулам:



$$(ср) = (B^2 \cdot z)/(2\pi \cdot \lambda), \quad \text{или} \quad (49 \text{ а})$$

$$(ср) = B/\sqrt{a \cdot \omega_T} = B/\sqrt{(a \cdot 2\pi)/z}. \quad (49 \text{ б})$$

Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(ср)$  ограждений зданий или сооружений всегда связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$a = \lambda/(ср), \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda = a \cdot (ср), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad (ср) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Вариант Б. Пластина (рис. 3.1).

При нагреве пластины, в зависимости от условий нагрева или охлаждения (граничных условий), конструкции экспериментальной установки или метода его осуществления, наблюдается три характерных режима.

1. Начальный период нагрева пластины.

Начальный период длится от начала нагрева с температурой  $T_0$  и заканчивается в момент времени ( $\tau_p$ ), когда интенсивность теплоты или плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева (нагревателя) достигнет максимума  $q_{\Pi}^{max}$ , что характеризует завершение начального периода и наступления регулярного или упорядоченного теплового режима. Внешнее тепловое воздействие затронет в какой-то мере центральные участки объема пластины и соответственно температура на поверхности со стороны нагревателя составит  $T_{\Pi 1}$ , а с противоположной стороны —  $T_{\Pi 2}$ .

Коэффициент теплоусвоения  $B$  при нагреве пластины в стадии наступления упорядоченного теплового режима — это отношение максимальной интенсивности или плотности теплового потока на поверхности  $q_{\Pi}^{max}$  к максимальной амплитуде колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  на поверхности нагрева пластины (рис. 3.1), в момент времени  $\tau_p$  и численно равен:

$$B = q_{\Pi}^{max} / \vartheta_{\Pi}^{max}.$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{\Pi}^{max}$  на поверхности нагрева пластины в момент максимального теплового потока на поверхности (при  $\tau_p$ ), согласно (12):

$$\vartheta_{\Pi}^{max} = 0,5 (T_{\Pi 1} - T_0).$$

Доля проникновения температурной волны  $\theta$  определяется для отсчета времени ( $\tau_p$ ) и замеренным значениям температур  $T_0$ ,  $T_{\Pi 1}$ ,  $T_{\Pi 2}$ , согласно разд. 3.2 и соотношения (25а) численно равна:

$$\theta_T = (T_{\Pi 2} - T_0)/(T_{\Pi 1} - T_0) = \vartheta_{\Pi 2} / \vartheta_{\Pi 1}.$$

То есть, допустим, что после определения доли проникновения гармонических колебаний она составит  $\theta_*$  или  $\theta^{-1} = 1/\theta_*$ . Тогда согласно (26):

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 1/\theta_*$$

Прологарифмировав левую и правую часть полученного соотношения, получим, что при условии  $x = \delta$ :  $(k \cdot \delta) \cdot \lg e = \lg (1/\theta_*)$ .

Так как:  $H = (k \cdot \delta)$ ,  $M = \lg e = 0,434$ , то:  $(H \cdot M) = \lg (1/\theta_*)$ .

Тогда безразмерное волновое число  $H$ :

$$H = \lg (1/\theta_*) / (\lg e) = \lg (1/\theta_*) / (0,434).$$

Согласно приведенной методике волновое число в пластине, для конкретного времени  $\tau_p$  нагрева (или охлаждения) определяется по ф-ле (29):

$$k_T^{пл} = H/\delta = \lg (1/\theta_*) / (0,434 \cdot \delta).$$

Теплоаккумулирующая способность всего объема материала (пластины), через который проходит температурная волна, в начальный период нагрева не остается постоянной. Часть теплоты идет на нагрев материала до средней температуры или на аккумуляцию. В начальный период нагрева, до момента времени ( $\tau_p$ ), гармонические колебания не затухающие, а угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в начальном периоде нагрева (до времени  $\tau_p$ ), будет иметь вид:  $\omega_T^{пл} = 2\pi/\tau_p$ .

Следовательно, коэффициент теплоусвоения  $B$  характеризующий теплоаккумулирующую способность всего объема материала (пластины) через который проходит температурная волна, в начальном периоде нагрева, а конкретно в момент времени  $\tau_p$ , будет больше, чем в области упорядоченного или стационарного теплового режима в пластине.

Коэффициент теплоусвоения  $B$ , теплопроводность  $\lambda$ , волновое число  $k_T^{пл}$ , объемная теплоемкость ( $c_p$ ), температуропроводность  $a$ , связаны одним из соотношений (48а), (48б), (48в), (20б), а именно:

$$B = \sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T^{пл} = 1,414 \cdot \lambda \cdot k_T^{пл}, \quad \text{или}$$

$$B = \sqrt{\lambda \cdot (c_p) \cdot \omega_T}, \quad \text{или} \quad B = (c_p) \sqrt{a \cdot \omega_T},$$

$$\text{и тогда: } \lambda = B/1,414 \cdot k_T^{пл}. \quad (50)$$

Объемная теплоемкость пластины в момент максимальной плотности теплового потока  $q_{II}^{max}$ , то есть в момент наступления упорядоченного теплового режима, согласно (48 б) и (48 в), определяется по формуле:

$$(c_p) = (B^2 \cdot \tau_p) / (2\pi \cdot \lambda). \quad (50 а)$$

Температуропроводность пластины в момент максимальной плотности теплового потока  $q_{\Pi}^{max}$ , то есть в момент наступления упорядоченного теплового режима, согласно (18), определяется по формуле:

$$a = \pi / [\tau_{\Pi} (k_{\Gamma}^{ПЛ})^2], \text{ м}^2/\text{с}. \quad (50 \text{ б})$$

Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$  связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$a = \lambda/(c\rho), \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \quad (c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}).$$

## 2. Упорядоченный тепловой режим в пластине.

Упорядоченный тепловой режим наступает после начального периода нагрева (охлаждения), и продолжается определенное время до начала наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ). Моменты времени в упорядоченном тепловом режиме ( $\tau_{\theta}$ ) определены от ( $\tau_{\Pi}$ ) до ( $\tau_*$ ), а температурная волна в пластине становится затухающая, с определенной увеличивающейся долей проникновения  $\theta_{\Gamma}$ , например: 10 % (0,1), 25 % (0,25) или 50 % (0,5).

Упорядоченный тепловой режим в течение времени переходит в стационарный тепловой режим, а время ( $\tau_*$ ) зависит от ТФС материала, граничных условий, экспериментальной установки и метода его осуществления.

Доля  $\theta_{\Gamma}$  проникновения температурных гармонических колебаний, определяется для любого отсчета времени  $\tau_{\theta}$  и замеренным значениям температур  $T_0, T_{\Pi 1}, T_{\Pi 2}$ , согласно проведенного физического эксперимента, а также соотношения (25 а). Методика расчета волнового числа  $k_{\Gamma}^{ПЛ}$  в пластине при любой доле проникновения гармонических колебаний  $\theta_{\Gamma}$  описана в разделе 3.2, а методика расчета коэффициента теплопроводности, теплоусвоения, объемной теплоемкости и температуропроводности аналогичен расчету при стационарном тепловом режиме.

## 3. Стационарный тепловой режим.

Стационарный тепловой режим в пластине при несимметричном нагреве наступает в момент времени ( $\tau_*$ ), когда по истечении времени упорядоченный тепловой режим вписывается в стационарную стадию, а температурная волна установится с определенной долей проникновения. При симметричном же нагреве тел (призмы, куба, шара) в течение времени упорядоченная стадия теплового режима переходит в термодинамическое равновесие с определенной долей проникновения температурной волны.

Время в стадии упорядоченного ( $\tau_{\theta}$ ), и время наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), определяет только половину времени полного периода колебания затухающей температурной волны, а вторая половина времени условно отводится на охлаждение пластины (рис. 3.2).

Поэтому, обосновано считать, что частота колебаний температурной полуволны  $\nu$  зависит от промежутка времени ( $\tau_\theta$ ) и ( $\tau_*$ ), и составит:  $\nu = 1/\tau_\theta$ , или соответственно  $\nu = 1/\tau_*$ , а частота колебания полной температурной волны составит:  $\nu = 1/2\tau_\theta$ , или соответственно:  $\nu = 1/2\tau_*$ .

Поэтому, угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в пластине, согласно (16), в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима будет иметь вид:

$$\omega_T^{пл} = 2\pi/z = 2\pi/2\tau_* = \pi/\tau_*, \quad 1/с.$$

Волновое число для пластины в стадии упорядоченного ( $\tau_\theta$ ) или стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), согласно выражения (20):

$$k_T^{пл} = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_*)}, \quad м^{-1}.$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{п,\tau}$  на поверхности пластины при нагреве, в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима, согласно (12):

$$\vartheta_{п,\tau_*} = 0,5 (T_{п1} - T_0) = 0,5 (T_{п1*} - T_{п2*}) = 0,5 \Delta T_* = 0,5 (T_H - T_X).$$

Коэффициент теплоусвоения  $B$  для любого определенного промежутка времени  $\tau$ , в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима, согласно (47а), численно равен:

$$B = q_{п,\tau} / \vartheta_{п,\tau_*}.$$

Объемная теплоемкость пластины в стадии упорядоченного ( $\tau_\theta$ ), и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), согласно (48 б, 48 в), определяется:

$$(ср) = (B^2 \cdot 2\tau) / (2\pi \cdot \lambda) = (B^2 \cdot \tau) / (\pi \cdot \lambda). \quad (51)$$

Если, в период наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), известна плотность теплового потока  $q_{пл}^*$  на поверхности, толщина пластины  $\delta$  и перепад температур по толщине  $\Delta T_*$ , то теплопроводность согласно закона Фурье (6):

$$\lambda = (q_{пл}^* \cdot \delta) / \Delta T_* = (q_{пл}^* \cdot \delta) / (T_H - T_X) = (q_{пл}^* \cdot \delta) / (T_{п1*} - T_{п2*}).$$

Температуропроводность  $a$  также может определяться соответственно из соотношения (7):  $a = \lambda / (ср)$ ,  $м^2/с$ .

Для установления дополнительных закономерностей тепло-звуковой аналогии в области стационарного и упорядоченного теплового режима проведем математический эксперимент.

Итак, в стадии наступления стационарного теплового режима в пластине (время  $\tau = \tau_*$ ), температурная волна станет затухающая, с определенной долей проникновения, число Фурье  $Fo = (a \cdot \tau_*)/\delta^2$ , разность температур на противоположных поверхностях пластины равна:  $\Delta T_* = T_H - T_X = 2 \vartheta_{\Pi}^{max}$  или  $\Delta T_* = T_{\Pi 1*} - T_{\Pi 2*}$ , а тепловой поток, согласно закона теплопроводности Фурье имеет вид (5):

$$q_{\Pi L}^* = \lambda (\Delta T_*/\delta) = (\lambda/\delta) \cdot (T_H - T_X) = (\lambda/\delta) \cdot (T_{\Pi 1*} - T_{\Pi 2*}).$$

$$\text{или } q_{\Pi L}^* / \Delta T_* = \lambda/\delta,$$

$$\text{или } q_{\Pi L}^* / 2 \vartheta_{\Pi, \tau} = \lambda/\delta.$$

Полученные соотношения, согласно выражений (6) и (45 а), можно записать и в виде:

$$q_{\Pi L}^* / 2 \vartheta_{\Pi, \tau} = (\sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T)/2 = \lambda/\delta \quad \text{или}$$

$$q_{\Pi L}^* / \vartheta_{\Pi, \tau} = (\sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T) = 2 \lambda/\delta \quad \text{или}$$

$$k_T^{\Pi L} \cdot \delta \cdot \sqrt{2} = 2, \text{ откуда}$$

$$k_T^{\Pi L} \cdot \delta = 2/\sqrt{2} = 2/1,414 = 1,414 \approx 1,41. \quad (51 \text{ а})$$

Следовательно, при нагреве пластины, в момент наступления стационарного теплового режима (время  $\tau = \tau_*$ ), безразмерное волновое число  $H$ , численно равно:

$$H = k_T^{\Pi L} \cdot \delta = 1,414 \approx 1,41. \quad (51 \text{ б})$$

Методика расчета волнового числа, приведенная в разделе 3.2, позволяет рассчитать и долю проникновения температурных гармонических колебаний в пластине. Доля проникновения температурных волн при наступлении стационарного режима, при  $H = 1,414$  численно равна:

$$\theta_T = 1/e^{kx} = 1/e^{1,414} = 1/4,114 = 0,243. \quad (51 \text{ в})$$

Полученный безразмерный волновой комплекс  $H = 1,414$ , соответствует доле проникновения гармонических колебаний  $\theta = 0,243$ . То есть в пластине имеем слой 24,3 % проникновения и 75,7 % поглощения гармонических колебаний температурной волны. Тогда полученное соотношение (51) позволяет в стадии упорядоченного ( $\tau_{\theta}$ ) или стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), при доле проникновения гармонических колебаний  $\theta = 0,243$  определить волновое температурное число в пластине:

$$k_T^{пл} = H/\delta = 1,414/\delta \approx 1,41/\delta. \quad (52)$$

Полученное соотношение (52) волнового числа в пластине  $k_T^{пл}$ , позволяет по формуле (20 а) определить температуропроводность пластины в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), либо по формуле (20 б) определить время наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ) в пластине, а именно:

$$a = \pi / [2\tau_* (k_T^{пл})^2], \text{ м}^2/\text{с}, \quad (52 \text{ а})$$

$$\tau_* = \pi / [2a (k_T^{пл})^2], \text{ с}. \quad (52 \text{ б})$$

После подстановки выражения (52) в (20 а), температуропроводность, при толщине пластины  $\delta$ , получит новую запись:

$$a = 0,785(\delta^2/\tau_*), \text{ или} \quad (53 \text{ а})$$

$$(a \cdot \tau_*) = 0,785 \cdot \delta^2, \text{ или}$$

$$(a \cdot \tau_*)/\delta^2 = 0,785. \quad (53 \text{ б})$$

Полученное выражение (53а) есть число Фурье, и следовательно:

$$Fo = (a \cdot \tau_*)/\delta^2 = 0,785 \approx 0,8 \quad (53 \text{ в})$$

Следовательно, при нагреве (или охлаждении) пластины, в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), безразмерный комплекс  $H = 1,414$ , доля проникновения  $\theta = 0,243$  а число Фурье:  $Fo = 0,785 \approx 0,8$ .

Установлено, что для пластины в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима, а также и в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) нагреве и охлаждении наружной поверхности, согласно (48 а), волновое число  $k_T^{пл}$  и  $k_T^{ст}$ , коэффициент теплоусвоения  $B$  и теплопроводность  $\lambda$ , связаны соотношением:

$$k_T^{пл} = k_T^{ст} = B/(\lambda \cdot \sqrt{2}) = B/(1,414 \cdot \lambda) = 0,707 (B/\lambda) \approx 0,71 (B/\lambda). \quad (54)$$

Следовательно, если получено волновое число для конкретного времени нагрева в пластине, согласно (52):  $k_T^{пл} = H/\delta$ , то теплопроводность для пластины в стадии упорядоченного ( $\tau_\theta$ ) и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины ( $\tau_p$ ), а также в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) охлаждении и нагреве поверхности, определяется по формуле:

$$\lambda = B/1,414 k_T^{пл} = 0,707 (B/k_T^{пл}) \approx 0,71 (B/k_T^{пл}) \approx 0,71 (B/k_T^{ст}). \quad (55)$$

Коэффициент теплоусвоения  $B$  согласно (48 а) определяется также и из соотношения:

$$B = \sqrt{2} \cdot \lambda \cdot k_T = 1,414 \cdot \lambda \cdot k_T \approx 1,41 \cdot \lambda \cdot k_T. \quad (55 \text{ а})$$

Объемная теплоемкость пластины в стадии упорядоченного ( $\tau_\theta$ ) и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), определяется по формуле:

$$(ср)_\theta = (B^2 \cdot 2\tau_\theta)/(2\pi \cdot \lambda) = (B^2 \cdot \tau_\theta)/(\pi \cdot \lambda). \quad (55 \text{ б})$$

$$(ср)_* = (B^2 \cdot 2\tau_*)/(2\pi \cdot \lambda) = (B^2 \cdot \tau_*)/(\pi \cdot \lambda). \quad (55 \text{ в})$$

Температуропроводность пластины в стадии упорядоченного ( $\tau_\theta$ ) и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), определяется по формуле:

$$a_\theta = \pi / [2\tau_\theta (k_T^{пл})^2] \quad \text{или} \quad (55 \text{ г})$$

$$a_* = \pi / [2\tau_* (k_T^{пл})^2]. \quad (55 \text{ д})$$

Соотношения (50), (51), (52), (53), (54) и (55) получены впервые и имеют огромное значение для экспериментального определения теплопроводности, теплоусвоения, температуропроводности, объемной теплоемкости материалов на образцах — пластинах, в стадиях упорядоченного и стационарного теплового режима, а также и при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины. Соответственно, теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $ср$ ) и весовая теплоемкость ( $с$ ) связаны соотношениями (7), (8) и (9).

С другой стороны, в стадии наступления стационарного теплового режима в пластине: разность температур  $\Delta T_* = T_H - T_X$ , тепловой поток на поверхности, согласно закона Фурье (5):

$$q_{II}^* = \lambda (\Delta T_*/\delta) = (\lambda/\delta) \cdot (T_H - T_X),$$

а максимальная амплитуда колебаний температурной волны на поверхности, согласно (12):

$$\vartheta_{II}^* = 0,5 (T_H - T_X), \text{ а } \Delta T_* = 2 \vartheta_{II}^*.$$

Тогда можно записать:

$$q_{II}^*/\Delta T_* = q_{II}^*/2 \vartheta_{II}^* = \lambda/\delta = 1/R_{пл}, \quad (56)$$

где  $R_{пл}$  — термическое сопротивление теплопроводности пластины, постоянная характеристика материала:  $R_{пл} = \delta/\lambda$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт.

Согласно (47 а):  $B = q_{\Pi, \tau} / \vartheta_{\Pi, \tau}$  и соотношения (56) можно записать:

$$q_{\Pi}^* / 2 \vartheta_{\Pi}^* = B / 2 = 1 / R_{\Pi \Pi} = \lambda / \delta. \quad (56 \text{ а})$$

Из полученного выражения (56 а) очевидно, что для пластины в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ):

$$B = 2 / R_{\Pi \Pi} = 2 \cdot \lambda / \delta = \lambda / 0,5 \cdot \delta, \quad (56 \text{ б})$$

$$\lambda = 0,5 (B \cdot \delta). \quad (56 \text{ в})$$

Соотношения (56 б) и (56 в) получены впервые и позволяют определять коэффициент теплоусвоения и теплопроводность в стадии наступления стационарного теплового режима.

*Математический метод определения плотности теплового потока на поверхности тел, материалов и ограждений зданий и сооружений.*

При проведении экспериментов по определению ТЗФС ограждений зданий и сооружений, материалов, тел, образцов выполненных в виде пластины (призмы), для расчета плотности теплового потока в зависимости от температуры наружной поверхности материала и температурой окружающего воздуха были произведены теплотехнические расчеты в определенных интервалах температур. Математическая обработка коэффициентов теплоотдачи конвекцией и лучеиспусканием при различных температурных напорах между поверхностью стены и наружным воздухом, позволила получить расчетные зависимости плотности теплового потока.

Расчетные формулы по удельной плотности теплового потока на поверхности представлены в зависимости от температурного напора  $\Delta t$  между воздухом и поверхностью тел и действительны только в определенном диапазоне температур, близких к реальным условиям.

1. Удельная плотность теплового потока на поверхности ограждения здания или сооружения.

Удельная плотность теплового потока на поверхности стены ограждения здания (перегородки) при нагреве или охлаждении наружным воздухом и естественной конвекции, представлена трехчленом вида:

$$q_{\Pi} = 4,6(\Delta t) + 0,035(\Delta t)^2 + 1,7(\Delta t)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2, \quad (57 \text{ а})$$

где:  $(\Delta t)$  — температурный напор между поверхностью стены ограждения здания и наружным воздухом, °C:  $(\Delta t) = t_{CT} - t_B$  или  $(\Delta t) = t_B - t_{CT}$ ;  $t_{CT}$  — темпера-



тура наружной поверхности ограждения (перегородки) здания менялась в диапазоне от  $(-6)^\circ\text{C}$  до  $(+25)^\circ\text{C}$ ;  $t_B$  — температура наружного воздуха менялась в диапазоне  $0^\circ\text{C}$  до  $(+30)^\circ\text{C}$ .

2. Удельная плотность теплового потока на поверхности тела (пластины, призмы) при нагреве или охлаждении на воздухе.

Удельная плотность теплового потока на поверхности тела (пластины, призмы) при нагреве или охлаждении на воздухе и естественной конвекции, представлена трехчленом вида:

$$q_{\text{п}} = 4,6(\Delta t) + 0,035(\Delta t)^2 + 1,5(\Delta t)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2, \quad (57 \text{ б})$$

где:  $(\Delta t)$  — температурный напор между поверхностью тела и окружающим воздухом  $^\circ\text{C}$ :  $(\Delta t) = t_{\text{п}} - t_B$ ;  $t_{\text{п}}$  — температура поверхности тела менялась в диапазоне от  $(+40)^\circ\text{C}$  до  $(+400)^\circ\text{C}$ ;  $t_B$  — температура окружающего или наружного воздуха менялась в диапазоне  $0$  до  $(+30)^\circ\text{C}$ .

Математический эксперимент позволил установить зависимости (57 а) и (57 б) для определения удельной плотности теплового потока на поверхности тел, материалов и ограждений зданий и сооружений.

Математический эксперимент позволяют сформулировать выводы по плотности теплового потока на поверхности тел и другим ТЗФС.

### *Выводы по 3.5*

1. Впервые установлена связь между плотностью теплового потока, амплитудой температурной волны, коэффициентом теплоусвоения, волновым числом, а также теплофизическими свойствами (теплопроводность, температуропроводность, объемная теплоемкость).

2. Соотношения (50), (51), (52), (53), (54) и (55) получены впервые и имеют огромное значение для экспериментального определения теплопроводности, теплоусвоения, температуропроводности, объемной теплоемкости материалов на образцах — пластинах, в стадиях упорядоченного и стационарного теплового режима, а также и при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины.

3. Впервые установлено, что если получено волновое число для конкретного времени нагрева в пластине, согласно (52):  $k_{\text{T}}^{\text{пл}} = H/\delta$ , то коэффициент теплопроводности для пластины в стадии упорядоченного ( $\tau_0$ ) и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины, а также в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) охлаждении и нагреве поверхности, определяется по формуле (55):  $\lambda = B/1,414 k_{\text{T}}^{\text{пл}} = 0,707 (B/k_{\text{T}}^{\text{пл}}) \approx 0,71 (B/k_{\text{T}}^{\text{пл}}) \approx 0,71 (B/k_{\text{T}}^{\text{ст}})$ .

4. Впервые установлено, что для пластины в стадии максимального теплового потока  $q_{\Pi}^{max}$ , то есть в момент наступления упорядоченного теплового режима, объемная теплоемкость пластины согласно (50 а), определяется по формуле:  $(ср) = (B^2 \cdot \tau_p) / (2\pi \cdot \lambda)$ , а температуропроводность пластины, согласно (50 б) определяется по формуле:  $a = \pi / [\tau_p (k_T^{пл})^2]$ .

5. Впервые установлено, что для пластины в стадии стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), а также и в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) охлаждении и нагреве наружной поверхности, безразмерный комплекс  $H$ , включающий волновое температурное число  $k_T^{пл}$ , численно равен:  $H = k_T^{пл} \cdot \delta = 1,414$ .

6. Впервые установлено, что при нагреве пластины в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), температуропроводность, согласно (53 а), (53 в), имеет вид:  $a = 0,8 (\delta^2 / \tau_*)$ , а число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_*) / \delta^2 = 0,8$ .

7. Впервые получены соотношения (56 б) и (56 в) для пластины, которые позволяют определять коэффициент теплоусвоения и теплопроводность пластины в стадии наступления стационарного теплового режима:  $B = 2/R_{пл}$ ;  $\lambda = 0,5 (B \cdot \delta)$ .

8. Впервые установлено, что для пластины, при нагреве или охлаждении, в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), а также и в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) нагреве и охлаждении наружной поверхности, согласно (54) и (55) волновое температурное число  $k_T^{пл}$  или  $k_T^{ст}$ , коэффициент теплоусвоения  $B$  и теплопроводность  $\lambda$ , связаны соотношением:  $k_T^{пл} = k_T^{ст} = 0,707 (B/\lambda)$ .

9. Установлена зависимость для определения удельной плотности теплового потока на поверхности тел и ограждений зданий (57 а) и (57 б).

### 3.6 Тепловое давление и термическое напряжение

В твердых телах за счет нагрева или охлаждения создается тепловое давление, термическое напряжение и как следствие, температурное расширение. Например, в металлах (сталь) при нагреве на 100 °С, за счет теплового давления и термического напряжения, происходит температурное расширение 0,8 мм на каждый погонный метр. Условно можно определить, что тепловое давление  $P_T$ , возникающее за счет нагрева твердых строительных материалов и изделий, это — разность между мгновенным значением динамического давления в точке среды, при прохождении через нее температурной волны или теплоты и статическим давлением в той же точке.

Тепловое давление имеет положительный знак при нагреве частиц материала или отрицательный знак — при их охлаждении. Тепловое давление  $P_T$

создаваемое на поверхности пластины или ограждения здания при их нагреве или охлаждении, за счет интенсивности теплоты или плотности теплового потока  $q_{\text{п}}$ , представляет собой силу  $P$  в Ньютонах, действующую на единицу поверхности  $F$  ( $\text{м}^2$ ):  $P_{\text{T}} = P/F$ ,  $\text{н}/\text{м}^2$ .

Эта единица называется Паскаль, Па, и численно равна:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ н}/\text{м}^2 = 1 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2).$$

Тепловой поток на поверхности любого твердого тела, изделия, ограждения здания или сооружения, или пластины, а также теплота внутри объема этого вещества создает тепловое давление, термическое напряжение  $\psi$ , и как следствие, температурное расширение.

Очевидно, что для условий установившегося стационарного теплового режима, при прохождении теплоты  $Q = 1$  Джоуль, в единицу времени  $\tau = 1$  с, через объем вещества  $V = 1 \text{ м}^3$ , возникает температурная волна с амплитудой  $\vartheta = 1^\circ\text{C}$ , которая в материале на поверхности (и внутри объема), создает тепловое давление  $P_{\text{T}} = 1 \text{ Па}$ . То есть по существу и по размерности выполняется условие:

$$1 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{K}) = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{K}) = 1 \text{ Па},$$

что подтверждает термодинамический закон (Менделеева—Клапейрона) и закон сохранения энергии, а именно в данном случае, перехода части тепловой энергии  $Q$  в механическую энергию, в виде теплового давления  $P_{\text{T}}$ .

Логика рассуждений позволяет заключить следующее:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ н}/\text{м}^2 = 1 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2); \quad 1 (\text{Па} \cdot \text{м}) = 1 \text{ кг}/\text{с}^2;$$

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{K}); \quad 1 (\text{Па} \cdot \text{м}) = 1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}).$$

Если рассматривать тело по глубине или толщине пластины, то тепловое давление действует на всю глубину материала изделия, пластины, ограждения здания и создает термическое напряжение.

На рис. 3.4 приведено распределение температур и термического напряжения в пластине толщиной  $\delta$  в стационарном тепловом режиме.

Термические напряжения  $\psi_x$  возникают в любой точке среды объема материала пластины или ограждения здания за счет нагрева или воздействия теплового потока любой интенсивности, при прохождении температурной волны, и представляют собой тепловое давление  $P_{\text{T}}$  (Па) действующее на единицу глубины по толщине пластины или ограждения  $\delta$  (м), т. е.:

$$\psi_x = P_{\text{T}} (\delta - x), \quad (\text{Па} \cdot \text{м}) \tag{58}$$

Согласно рис. 3.4, при нагреве пластины до стационарного теплового режима, распределение температур по глубине имеет линейный вид, относительное максимальное термическое напряжение (относительно холодильника) со-

здается на поверхности пластины со стороны нагревателя (при  $x = 0$ ), а относительное нулевое значение  $\psi_x = 0$ , будет на поверхности пластины со стороны холодильника (при  $x = \delta$ ) т. е:

$$\psi_{x=0} = \psi_{\Pi} = P_T \cdot \delta, \text{ (Па} \cdot \text{м)}, \text{ соответственно: } \psi_{x=\delta} = 0. \quad (58 \text{ а})$$

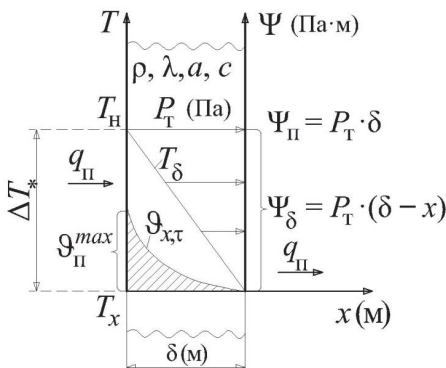


Рис. 3.4 Распределение температур  $T$  и термического напряжения  $\psi$  в пластине толщиной  $\delta$ , в стационарном тепловом режиме  $\tau$ :

- $T_H$  — температура нагревателя или нагретой поверхности  $T_{\Pi}$ ;
- $T_X$  — температура холодильника или охлаждаемой поверхности  $T_{\Pi 2}$ ;
- $T_\delta$  — распределение температуры по толщине пластины;
- $\Delta T_*$  — перепад температур на внешней и внутренней поверхности пластины в стационарном режиме:  $\Delta T_* = T_H - T_X$ ;
- $\vartheta_{x,t}$  — амплитуда колебаний избыточной температуры,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда температурной волны,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $q_{\Pi}$  — плотность теплового потока в стационарном режиме,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
- $\delta$  — толщина пластины, изделия, м;
- $\psi$  — термическое напряжение,  $(\text{Па} \cdot \text{м})$ ;
- $\rho$  — удельная плотность материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $\lambda$  — теплопроводность,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ ;
- $a$  — температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;
- $c$  — массовая (весовая) изобарная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;
- $P_T$  — тепловое (термическое) давление, Па;
- $\psi_\delta = P_T (\delta - x)$  — термическое напряжение по толщине,  $(\text{Па} \cdot \text{м})$ ;
- $\psi_{\Pi} = (P_T \cdot \delta)$  — термическое напряжение на поверхности,  $(\text{Па} \cdot \text{м})$ ;

*Термическое напряжение* на поверхности при нагреве (охлаждении) пластины или ограждения здания — это отношение удельной (интегральной)

плотности теплового потока  $q_{п.уд}$  к максимальной амплитуде колебаний температуры на поверхности  $\vartheta_{п}^{max}$ , т. е:

$$\psi_{п} = q_{п.уд} / \vartheta_{п}^{max}, \text{ (Па} \cdot \text{м)}. \quad (58 \text{ б})$$

Рассмотрим два конкретных варианта.

**Вариант А.** Нагрев пластины до стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ).

При стационарном тепловом режиме плотность теплового потока  $q_{п}^*$  сохраняется на протяжении всего времени нагрева, то есть, равно удельному значению:  $q_{п}^* = q_{п.уд} = q_{п}^{max}$ . Перепад температур на внешней и внутренней поверхности пластины в стационарном тепловом режиме:  $\Delta T_* = T_{н} - T_{х}$ .

Согласно (58 б), для пластины имеем

$$\psi_{п}^{пл} = q_{п.уд} / \vartheta_{п}^{max} = q_{п}^{max} / \vartheta_{п}^{max} = q_{п}^* / \vartheta_{п}^{max}. \quad (59)$$

Сравнивая полученные соотношения (47):  $B = q_{п}^{max} / \vartheta_{п}^{max}$  и (59) можно сделать вывод о том, что термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{п}^{пл}$  (Па · м), численно пропорционально коэффициенту теплоусвоения  $B$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К). Очевидно, что чем выше теплоусвоение твердых строительных и теплоизоляционных материалов, тем выше в них термическое напряжение:

$$\psi_{п}^{пл} = B \quad (60)$$

С другой стороны, в стадии стационарного теплового режима в пластине: разность температур:  $\Delta T_* = (T_{н} - T_{х}) = 2 \vartheta_{п}^{max}$ , тепловой поток на поверхности согласно закона Фурье (5):

$$q_{п}^* = \lambda (\Delta T_* / \delta) = (\lambda / \delta) \cdot (T_{н} - T_{х}),$$

а максимальная амплитуда колебаний температурной волны на поверхности, согласно (12):

$$\vartheta_{п}^{max} = 0,5 (T_{н} - T_{х}).$$

Тогда можно записать:

$$q_{п}^{max} / \Delta T_* = q_{п}^* / (T_{н} - T_{х}) = q_{п}^* / 2 \vartheta_{п}^{max} = \lambda / \delta = 1 / R_{пл}, \quad (61)$$

где  $R_{пл}$  — термическое сопротивление теплопроводности, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Сопоставляя полученные выражения (47), (60) и (61) можно записать:

$$q_{п}^{max} / 2 \vartheta_{п}^{max} = B / 2 = \psi_{п}^{пл} / 2 = 1 / R_{пл}. \quad (62)$$

Из последнего выражения (62) очевидно, что для пластины в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ):

$$\psi_{п}^{пл} = 2 / R_{пл} = 1 / (0,5 \cdot R_{пл}), \text{ (Па} \cdot \text{м)}. \quad (63)$$

То есть, при исследовании ТЗФС строительных и теплоизоляционных твердых материалов, в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима, термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\text{П}}^{\text{пл}}$  обратно пропорционально половине (0,5) термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\text{Пл}}$ .

**Вариант Б.** Циклический подвод теплоты в течение суток к наружной поверхности ограждения здания (рис. 3.3).

В этом случае происходят полупериодические процессы накопления и расхода тепловой энергии, численно равные между собой и отличающиеся по знаку. Термическое напряжение на поверхности ограждения здания тоже будет изменяться, а удельное или интегральное значение термического напряжения будет численно равно половине от максимального значения:

$$\psi_{\text{П}}^{\text{ст}} = 0,5 (q_{\text{П}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{П}}^{\text{max}}), \quad (\text{Па} \cdot \text{м}) \quad (64)$$

Сравнивая (47) и (64) можно сделать вывод о том, что термическое напряжение на поверхности стены, ограждения здания  $\psi_{\text{П}}^{\text{ст}}$ , при циклическом подводе (отводе) теплоты, численно пропорционально половине коэффициента теплоусвоения  $B$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), или:

$$\psi_{\text{П}}^{\text{ст}} = 0,5 B = B/2 \quad (65)$$

С другой стороны, сопоставляя выражения (62) и (64) получим соотношение для стены ограждения здания:

$$\begin{aligned} (0,5 q_{\text{П}}^{\text{max}}) / (2 \vartheta_{\text{П}}^{\text{max}}) &= (0,5 \psi_{\text{П}}^{\text{ст}}) / 2 = 1/R_{\text{СТ}}, \text{ или} \\ \psi_{\text{П}}^{\text{ст}} / 4 &= 1/R_{\text{СТ}}, \text{ или} \\ \psi_{\text{П}}^{\text{ст}} &= 4/R_{\text{СТ}} = 1/(0,25 \cdot R_{\text{СТ}}), \quad (\text{Па} \cdot \text{м}). \end{aligned} \quad (66)$$

То есть, термическое напряжение на поверхности ограждения здания  $\psi_{\text{П}}^{\text{ст}}$  при максимальном значении плотности теплового потока, обратно пропорционально четверти (0,25) термического сопротивления теплопроводности стены  $R_{\text{СТ}}$ .

*Вывод по «термическому напряжению» на поверхности пластины и ограждения здания 3.6*

1. Впервые получено теоретическое и графическое распределение термического напряжения в пластине (рис. 3.4), а также получены зависимости термического напряжения на поверхности пластины, при нагреве до момента наступления стационарного теплового режима (60) и (63).

2. Впервые получены зависимости термического напряжения на поверхности ограждения здания, при циклическом подводе теплоты в течение суток, (64) и (65).

3. Установлено, что чем выше теплоусвоение материала пластины или стены  $B$ , тем выше в нем термическое напряжение на поверхности  $\psi_{\Pi}$ .

4. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{пл}$  при нагреве тепловым потоком  $q_{\Pi}^{max}$ , численно пропорционально коэффициенту теплоусвоения  $B$  и имеет размерность, (Па · м), (60).

5. Термическое напряжение на поверхности ограждения здания  $\psi_{\Pi}^{ст}$ , при циклическом подводе теплового потока  $q_{\Pi}$  за сутки, численно пропорционально половинному значению коэффициента теплоусвоения  $B$  и имеет размерность, (Па · м), (65).

6. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{пл}$ , в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима, обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности  $R_{пл}$  (63).

7. Термическое напряжение на поверхности ограждения здания  $\psi_{\Pi}^{ст}$ , при максимальном значении плотности теплового потока, обратно пропорционально четверти термического сопротивления теплопроводности стены  $R_{ст}$  (66).

### 3.7 Поверхностная плотность материалов и изделий

Для начала следует определиться, что для любого твердого тела — образца в виде пластины, перегородки, либо ограждения здания существует понятие удельная плотность материала (вещества) —  $\rho$ , в кг/м<sup>3</sup>, а также поверхностная плотность —  $\rho_{\Pi}$ , в кг/м<sup>2</sup>.

Удельная плотность  $\rho$  — это масса вещества  $m$  (кг), приходящаяся на единицу объема  $V$  (м<sup>3</sup>), т. е:  $\rho = m/V$ , кг/м<sup>3</sup>.

Поверхностная плотность  $\rho_{\Pi}$  — это масса вещества (пластины, ограждения)  $m$  (кг), приходящаяся на единицу поверхности изделия (пластины, ограждения)  $F$  (м<sup>2</sup>), т. е:  $\rho_{\Pi} = m/F$ , кг/м<sup>2</sup>.

Следует отметить, что удельная и поверхностная плотность вещества влияет на методики определения ТЗФС материалов, а в чем их различие и возможности применения, рассмотрим на конкретных примерах.

Рассмотрим образец — пластину с размерами 0,25×0,25×0,04 м, которые часто используются в различных приборах, например ИТП–250 и т. п. Допустим, что пластина имеет массу  $m = 5$  кг, тогда соответственно объем равен  $V = 0,0025$  м<sup>3</sup>, а удельная плотность:  $\rho = m/V = 5/0,0025 = 2000$  кг/м<sup>3</sup>.

Разумеется, что в 1 м<sup>3</sup> уместится 400 образцов по 5 кг, с общим весом 2000 кг, а удельная плотность составит также 2000 кг/м<sup>3</sup>.

Если через этот образец (пластину), с размерами  $0,25 \times 0,25 \times 0,04$  м, массой 5 кг, проходит температурная или звуковая волна, перпендикулярно поверхности  $F = 0,25 \times 0,25 = 0,0625$  м<sup>2</sup>, то поверхностная плотность составит:  $\rho_{\Pi} = m/F = 5/0,0625 = 80$  кг/м<sup>2</sup>.

Разумеется, что для одного квадратного метра образца, 1 м<sup>2</sup>, толщиной  $\delta = 0,04$  м, будет вмещаться 16 таких образцов с размером:  $0,25 \times 0,25 \times 0,04$  м, а поверхностная плотность составит:  $\rho_{\Pi} = m/F = 5 \cdot 16/1 = 80$  кг/м<sup>2</sup>.

Разумеется, что в одном кубическом метре образца,  $V = 1$  м<sup>3</sup>, толщиной  $\delta = 1$  м, будет вмещаться 25 рядов пластин толщиной по 0,04 м, а поверхностная плотность составит:  $\rho_{\Pi} = 25$  рядов  $\cdot 80$  кг/м<sup>2</sup> = 2000 кг/м<sup>2</sup>.

Соответственно, в образце толщиной  $\delta = 2$  м, поверхностная плотность будет составлять  $\rho_{\Pi} = 4000$  кг/м<sup>2</sup>, а в образце толщиной  $\delta = 3$  м, поверхностная плотность будет соответственно составлять  $\rho_{\Pi} = 6000$  кг/м<sup>2</sup>, и т.д.

То есть, только в одном кубическом метре вещества, удельная и поверхностная плотность материала, образца, имеют одинаковое числовое значение — 2000, но различную размерность:

- удельная плотность  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup>,
- поверхностная плотность  $\rho_{\Pi} = 2000$  кг/м<sup>2</sup>.

Что это за парадокс и что он дает в плане эксперимента, если в теплотехническом и акустическом эксперименте чаще всего используют образцы незначительных размеров с  $\rho_{\Pi} < 200$  кг/м<sup>2</sup>, а в натуральных условиях строительства зданий и сооружений  $\rho_{\Pi} > 200$  кг/м<sup>2</sup>. При этом удельная плотность  $\rho$ , независимо от толщины образца  $\delta$  (изделия), стены, перегородки, остается одна и та же.

Проведенный математический эксперимент позволяет установить, что поверхностная плотность  $\rho_{\Pi}$  (кг/м<sup>2</sup>), удельная плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), толщина образца (изделия), пластины, перегородки, ограждения здания  $\delta$  (м), связаны соотношением:

$$\rho_{\Pi} = \rho \cdot \delta, \text{ или } \rho = \rho_{\Pi}/\delta. \quad (67)$$

Следовательно, при прохождении температурной или звуковой волны через один квадратный метр поверхности, на один погонный метр толщины (глубины), то есть, через один метр толщины образца (изделия), поверхностная и удельная плотность материала (вещества) равны численно, а именно:  $\rho_{\Pi} = \rho$ , при  $\delta = 1$  м.

Важно отметить, что в ограждениях зданий и сооружений при циклическом подводе (отводе) теплоты на поверхности стены здания поверхностная плотность  $\rho_{\Pi}$  и теплопроводность  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  связаны зависимостью:



$$\alpha_{\text{терм}}^{\text{ст}} = 10^{-0,002 \cdot \rho_{\text{п}}} \quad (68)$$

Термоизоляция стены ограждения здания, в децибелах (дБ), при циклическом (24 час) подводе теплоты, определяется по формуле (41) и тогда с учетом зависимости (68), будем иметь:

$$R_{\text{терм}} = 10 \lg (1/\alpha_{\text{терм}}) = 10 \lg (10^{0,002 \cdot \rho_{\text{п}}}) = 0,02 \cdot \rho_{\text{п}}, \quad (69)$$

Из логарифмической зависимости (69) получается, что поверхностная плотность ограждения здания, стены, перегородки, имеет вид:

$$\rho_{\text{п}} = R_{\text{терм}}/0,02 = 50 R_{\text{терм}} \quad (70)$$

Соотношение (70) получено впервые и позволяет определять поверхностную плотность  $\rho_{\text{п}}$  по значению термоизоляции  $R_{\text{терм}}$ , а следовательно определять и удельную плотность ограждения здания  $\rho$ , по формуле (67), а именно:  $\rho = \rho_{\text{п}}/\delta$ , что невероятно важно при эксплуатации стен, перегородок зданий и сооружений, а также определения ТЗФС. Ранее таких возможностей не существовало, а разработанная тепло-звуковая аналогия и математический эксперимент позволяют это сделать.

#### *Выводы по 3.7*

1. Проведенный математический эксперимент позволяет установить, что поверхностная плотность  $\rho_{\text{п}}$  (кг/м<sup>2</sup>), удельная плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), толщина образца (изделия), пластины, перегородки, ограждения здания  $\delta$  (м), связаны соотношением:  $\rho_{\text{п}} = \rho \cdot \delta$ , или  $\rho = \rho_{\text{п}}/\delta$ .

2. Установлено, что при прохождении температурной или звуковой волны через один квадратный метр поверхности, на один погонный метр толщины (глубины), то есть, через один метр толщины образца (изделия), поверхностная и удельная плотность материала (вещества) равны численно, а именно:  $\rho_{\text{п}} = \rho$  (при  $\delta = 1$  м).

3. Впервые получено соотношение (70), которое позволяет определять поверхностную плотность ограждения здания  $\rho_{\text{п}}$  по значению термоизоляции  $R_{\text{терм}}$ , т.е:  $\rho_{\text{п}} = 50 R_{\text{терм}}$ , а следовательно и удельную плотность ограждения здания  $\rho$  по формуле (67):  $\rho = \rho_{\text{п}}/\delta$ .

### **3.8 Поверхностная скорость плоской температурной волны**

Для установления поверхностной скорости плоской температурной волны проведем математический эксперимент. Для математического эксперимента возьмем объем материала (вещества) с удельной плотностью  $\rho$  и выделим в

нем несколько сечений, то есть несколько условных пластин с толщиной:  $\delta = 0,1$  м;  $\delta = 0,25$  м;  $\delta = 0,5$  м;  $\delta = 0,75$  м;  $\delta = 1$  м. Тогда для каждой условной пластины поверхностная плотность определится по формуле (67), а именно:  $\rho_{\Pi} = \rho \cdot \delta$ :

$$\rho_{\Pi=0,1\text{ м}} = \rho (\delta = 0,1) = 0,1 \rho;$$

$$\rho_{\Pi=0,25\text{ м}} = \rho (\delta = 0,25) = 0,25 \rho;$$

$$\rho_{\Pi=0,5\text{ м}} = \rho (\delta = 0,5) = 0,2 \rho;$$

$$\rho_{\Pi=0,75\text{ м}} = \rho (\delta = 0,75) = 0,75 \rho;$$

$$\rho_{\Pi=1\text{ м}} = \rho (\delta = 1) = \rho.$$

На рис. 3.5 приведено распределение температур в пластинах с соответствующей условной толщиной  $\delta$  (м) и следовательно, с соответствующей поверхностной плотностью  $\rho_{\Pi}$ .

При нагреве каждого условного объема пластины, с соответствующей толщиной  $\delta$ , в области упорядоченного теплового режима распределение избыточных температур  $\vartheta_{x,\tau}$ , будут иметь вид экспонент, а в области стационарного теплового режима при времени ( $\tau_*$ ), распределение температур в пластинах имеют линейную зависимость  $T_{\delta}$ , согласно закона Фурье.

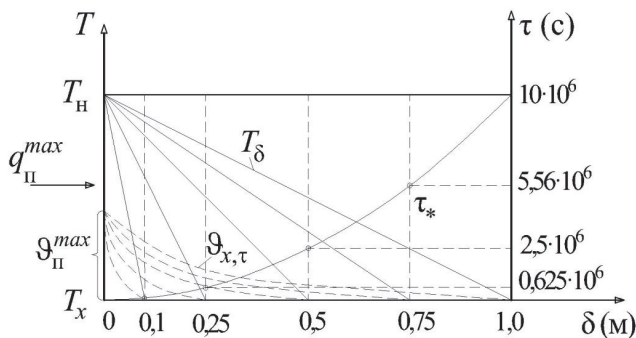


Рис. 3.5 Распределение температур в пластинах условной толщиной  $\delta$  при стационарном тепловом режиме

- $T_H$  — температура поверхности со стороны нагревателя ( $T_H = \text{const}$ );
- $T_X$  — температура поверхности со стороны холодильника ( $T_X = \text{const}$ );
- $T_{\delta}$  — распределение температуры по толщине пластины  $\delta$ ;
- $\tau$  — время, с;
- $\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима в пластине при соответствующей толщине  $\delta$ , с;
- $q_{\Pi}^{max}$  — максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины, Вт/м<sup>2</sup>;

$\vartheta_{x,\tau}$  — избыточные температуры температурной полуволны в пластине;  
 $\vartheta_{\Pi}^{max}$  — максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны  
на поверхности нагрева пластины.

Для математического эксперимента выберем материал пластины (вещества) с теплопроводностью:  $a = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, а безразмерное число Фурье примем:  $Fo = 1$ . Сформулируем понятие поверхностной скорости плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  и математическое определение.

*Поверхностная скорость плоской температурной волны в пластине  $S_{\Pi}$*  — это, с точки зрения математического анализа, среднее интегральное значение скорости температурной волны на участке  $\Delta\delta$ , за время  $\Delta\tau$ , от начального времени  $\tau_0$  до времени наступления стационарного теплового режима  $\tau_*$ :

$$S_{\Pi} = \frac{\int_{\tau_0}^{\tau_*} \frac{\Delta\delta}{\Delta\tau} d\tau}{\tau_*}, \text{ (м/с)}. \quad (71)$$

Поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  (м/с) характеризует распределение температурной волны от наружной поверхности пластины со стороны нагревателя, до холодильника, при поверхностной плотности условной пластины  $\rho_{\Pi}$  (кг/м<sup>2</sup>), то есть при соответствующей толщине пластины  $\delta$  (м). Прилагательное — «плоская» температурная волна, означает рассмотрение температурных и тепловых процессов в плоской системе координат (в пластине), ввиду наличия цилиндрических и шаровых волн, которые будут рассмотрены отдельно. В дальнейшем прилагательное «плоская», для краткости будет не использовано, а только подразумеваться.

Если для математического эксперимента установить произвольное число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau) / \delta^2 = 1$ , тогда время наступления стационарного теплового режима в пластине  $\tau_*$ :

$$\tau_* = Fo \cdot (\delta^2 / a) = 1 \cdot (\delta^2 / a) = \delta^2 / a.$$

Соответственно для пластины (рис 3.5) с толщиной  $\delta$ , время  $\tau_*$  будет иметь следующие значения:

$$\delta = 0,1 \text{ м, время } \tau_* = (0,1)^2 / 0,1 \cdot 10^{-6} = 0,1 \cdot 10^6 \text{ с;}$$

$$\delta = 0,25 \text{ м, время } \tau_* = (0,25)^2 / 0,1 \cdot 10^{-6} = 0,625 \cdot 10^6 \text{ с;}$$

$$\delta = 0,5 \text{ м, время } \tau_* = (0,5)^2 / 0,1 \cdot 10^{-6} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ с;}$$

$$\delta = 0,75 \text{ м, время } \tau_* = (0,75)^2 / 0,1 \cdot 10^{-6} = 5,56 \cdot 10^6 \text{ с;}$$

$$\delta = 1 \text{ м, время } \tau_* = (1)^2 / 0,1 \cdot 10^{-6} = 10 \cdot 10^6 \text{ с.}$$

В рассмотренном примере математического эксперимента поверхностная скорость температурной волны  $S_{\Pi}$  — это отношение пути  $\delta$  пройденного температурной волной, за время  $\tau_*$ , до момента наступления стационарного теплового режима в пластине:

$$S_{\Pi} = \delta/\tau_* \quad (72)$$

Соответственно,  $S_{\Pi}$  для условных пластин:

$$\delta = 0,1 \text{ м}, \quad S_{\Pi=0,1} = 0,1/0,1 \cdot 10^6 = 1 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с};$$

$$\delta = 0,25 \text{ м}, \quad S_{\Pi=0,25} = 0,25/0,625 \cdot 10^6 = 0,4 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с};$$

$$\delta = 0,5 \text{ м}, \quad S_{\Pi=0,5} = 0,5/2,5 \cdot 10^6 = 0,2 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с};$$

$$\delta = 0,75 \text{ м}, \quad S_{\Pi=0,75} = 0,1/0,1 \cdot 10^6 = 1 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с};$$

$$\delta = 1 \text{ м}, \quad S_{\Pi=1} = 1/10 \cdot 10^6 = 0,1 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с}.$$

Из приведенных расчетов и построений рис. 3.5 видно, что при толщине пластины  $\delta = 1$  м, поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi=1}$  численно пропорциональна теплопроводности материала  $a$ :

$$S_{\Pi=1} = a/(\delta = 1 \text{ м}) = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ (м/с)}.$$

Математический эксперимент позволяет установить зависимость:

$$S_{\Pi} = a/\delta, \text{ или } a = S_{\Pi} \cdot \delta. \quad (73)$$

Следовательно: *поверхностная скорость плоской температурной волны в пластине  $S_{\Pi}$  численно равна отношению пути  $\delta$  (м) пройденного температурной волной, за время  $\tau_*$ (с), до момента наступления стационарного теплового режима:  $S_{\Pi} = \delta/\tau_*$  (м/с).*

Поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi=1}$  численно пропорциональна теплопроводности материала (вещества)  $a$ , при толщине пластины  $\delta = 1$  м, то есть:  $S_{\Pi=1} = a/1$ , при  $\delta = 1$  м. Установлена зависимость:  $S_{\Pi} = a/\delta$ , или:  $a = S_{\Pi} \cdot \delta$ .

Ранее (67) установлено, что аналогично ведет себя и поверхностная плотность  $\rho_{\Pi}$  ( $\rho_{\Pi} = \rho \cdot \delta$ ), которая при толщине пластины  $\delta = 1$  м, численно равна удельной плотности  $\rho$ . Так как, поверхностная плотность  $\rho_{\Pi}$  пропорциональна толщине пластины  $\delta$ , то устанавливается соотношение или правило для температурной волны.

*Правило температурной волны:* поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , проходящей через плоское твердое тело, уменьшается

пропорционально увеличению поверхностной плотности вещества, а при численном равенстве удельной и поверхностной плотности (то есть, при толщине пластины  $\delta = 1\text{ м}$ ), поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с), соответственно при  $\delta = 1\text{ м}$ , численно пропорциональна температуропроводности вещества  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), т.е. устанавливается соотношение:

$$S_{\Pi}^* = a, \text{ при } \delta = 1\text{ м}; \text{ или: } S_{\Pi}^* = a/1\text{ м}. \quad (73 \text{ а})$$

Из формулировки правила температурной волны вытекает новый физический смысл температуропроводности.

*Физический смысл температуропроводности* вещества (материала): температуропроводность  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) характеризует поверхностную скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с) на глубине (толщине пластины, изделия)  $\delta = 1\text{ м}$ , в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ).

Используя зависимости (связи) теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости (7), (8), (9), удельной весовой (массовой) теплоемкости ( $c$ ), поверхностной плотности  $\rho_{\Pi}$ , а также полученные ранее соотношения (67) и (73), возможно установить следующие новые соотношения для экспериментального определения ТЗФС материалов и изделий:

$$S_{\Pi} = \lambda/[(c\rho) \cdot \delta], \text{ м/с}; \quad (74)$$

$$S_{\Pi} = \lambda/(c \cdot \rho_{\Pi}), \text{ м/с}; \quad (75)$$

$$(c\rho) = \lambda/(S_{\Pi} \cdot \delta), \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}); \quad (76)$$

$$c = \lambda/(S_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}), \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (77)$$

### *Выводы по 3.8*

1. Впервые сформулировано правило плоской температурной волны: поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , проходящей через твердое тело, уменьшается пропорционально увеличению поверхностной плотности вещества, а при численном равенстве удельной и поверхностной плотности (то есть, при толщине пластины  $\delta = 1\text{ м}$ ), поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с), соответственно при  $\delta = 1\text{ м}$ , численно пропорциональна температуропроводности вещества  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), т.е. устанавливается соотношение:  $S_{\Pi}^* = a$ , при  $\delta = 1\text{ м}$ ; или:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{ м}$ .

2. Из правила температурной волны впервые сформулирован новый физический смысл коэффициента температуропроводности вещества (матери-

ала): температуропроводность вещества  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) характеризует поверхностную скорость плоской температурной волны  $S_{\text{П}}^*$  ( $\text{м}/\text{с}$ ) на глубине (толщине пластины)  $\delta = 1\text{ м}$ , в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ).

3. Впервые установлены соотношения (74), (75), (76) и (77), связывающие поверхностную скорость плоской температурной волны  $S_{\text{П}}$ , температуропроводность  $a$ , теплопроводность  $\lambda$ , объемную теплоемкость ( $ср$ ), удельную весовую теплоемкость ( $c$ ) и поверхностную плотность материала  $\rho_{\text{П}}$ .

### 3.9 Плотность тепловой и акустической энергии

За время прохождения теплового потока и температурной волны через любое плоское тело или пластину, или ограждение здания (перегородки), материал (вещество) одновременно и накапливает (аккумулирует) тепловую энергию (Дж), и частично пропускает через себя. То есть, параллельно температурным волнам наблюдается проникающая теплопередача, сопровождающаяся расходом и накоплением тепловой энергии.

В момент наступления стационарного теплового режима в теле, пластине аккумуляция завершается полностью, а вся подводимая энергия к наружной поверхности пластины со стороны нагрева ( $x = 0$ ) пройдет сквозь тело, пластину, ограждение, то есть, установится постоянный тепловой поток  $q_{\text{П}} = \text{const}$ . Распределение температуры внутри пластины  $T_{\delta}$  (рис. 4) будет иметь линейный вид от  $T_{\text{Н}}$  до  $T_{\text{Х}}$ .

Плотностью тепловой энергии  $\mathcal{E}_{\text{T}}$  — называется количество тепловой энергии в Дж, подведенной в процессе нагрева, к единице объема  $V$  ( $\text{м}^3$ ). Плотность тепловой энергии  $\mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}}$  ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ ), объемная теплоемкость ( $ср$ ) и разность температур на поверхностях пластины  $\Delta T_*$  в стационарном тепловом режиме ( $\tau_*$ ), связаны соотношением:

$$\mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}} = (ср) \cdot \Delta T_*, \text{ Дж}/\text{м}^3; \quad (78)$$

$$(ср) = \mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}} / \Delta T_*, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}). \quad (78 \text{ а})$$

Плотность звуковой (акустической) энергии  $\mathcal{E}_{\text{А}}$  — называется количество звуковой (акустической) энергии в Дж, находящейся в единице объема  $\text{м}^3$ . Интенсивность звука  $J$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ), плотность звуковой энергии  $\mathcal{E}_{\text{А}}$  ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ ) и акустическая скорость вещества (материала)  $C_{\text{А}}$  ( $\text{м}/\text{с}$ ) связаны соотношением:

$$J = \mathcal{E}_{\text{А}} \cdot C_{\text{А}} \text{ или } \mathcal{E}_{\text{А}} = J / C_{\text{А}} \quad (79)$$

Используя зависимости (5), (74), (76) и (78) можно установить, что плотность теплового потока на поверхности пластины  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$ , плотность тепловой

энергии  $\mathcal{E}_T$ , поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , связаны соотношением:

$$q_{\Pi}^{max} = \mathcal{E}_T \cdot S_{\Pi}, \quad (80)$$

$$\mathcal{E}_T = q_{\Pi}^{max} / S_{\Pi}, \quad (81)$$

$$S_{\Pi} = q_{\Pi}^{max} / \mathcal{E}_T. \quad (82)$$

*Выводы по 3.9*

1. Впервые сформулировано определение плотности тепловой энергии.

2. Впервые установлены соотношения (78), (80), (81) и (82), связывающие: плотность тепловой энергии  $\mathcal{E}_T$ , объемную теплоемкость ( $c\rho$ ), максимальную разность температур на поверхностях пластины  $\Delta T_*$  в стационарном тепловом режиме, плотность теплового потока на поверхности пластины  $q_{\Pi}^{max}$ , поверхностную скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ .

### 3.10 Закон температурной волны.

#### Безразмерное число волновой скорости

Математический эксперимент по тепло-звуковой аналогии позволяет установить *закон температурной волны*: квадрат поверхностной скорости плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  (м/с), проходящей через пластину (ограждение здания), прямо пропорционален термическому напряжению на поверхности  $\Psi_{\Pi}$  (Па · м) и обратно пропорционален поверхностной плотности изделия  $\rho_{\Pi}$  (кг/м<sup>2</sup>):

$$S_{\Pi}^2 = \Phi_K (\Psi_{\Pi} / \rho_{\Pi}), \quad (83)$$

где:  $\Phi_K$  — безразмерное число волновой скорости.

Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K$  (число Фокина), есть отношение поверхностной скорости плоской температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с) на глубине материала  $\delta = 1$  м, к скорости звуковой (акустической) волны  $C_A$  (м/с) в изделии, материале (веществе):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^* / C_A, \quad (84)$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть  $S_{\Pi}^* = a / 1$  м.

Если при экспериментальных исследованиях определяется: поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  (м/с), термическое напряжение на поверхности  $\Psi_{\Pi}$  (Па·м) и поверхностная плотность  $\rho_{\Pi}$  (кг/м<sup>2</sup>), то согласно (83):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}). \quad (85)$$

Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K$  позволяет определить звуковую (акустическую) скорость в материале (веществе) из соотношения (84):

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K. \quad (86)$$

Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K$  для большинства твердых строительных, теплоизоляционных, композиционных и облицовочных материалов находится в пределах  $10^{-9} \div 10^{-12}$ , а для металлов  $10^{-8} \div 10^{-10}$ .

*Вывод по 3.10*

1. Впервые установлен закон температурной волны на основе тепло-звуковой аналогии (83).

2. Впервые определено и сформулировано безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K$  (84), которое устанавливает зависимость (связь) между поверхностной скоростью температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с) и звуковой (акустической) скоростью в материале  $C_A$  (м/с).

3. Тепло-звуковая аналогия позволяет определять скорость звука в материалах по температурным и тепловым измерениям на поверхности, методом неразрушающего контроля.

### 3.11 Длина свободного пробега фонона

Фононная теория теплопроводности [17] устанавливает связь, согласно которой коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для твердых материалов и веществ определяется из соотношения:

$$\lambda = 0,333 \cdot (c_p) \cdot C_{\Phi} \cdot L_{\Phi}, \quad (87)$$

где:  $(c_p)$  — объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $C_{\Phi}$  — скорость фононов, м/с;  $L_{\Phi}$  — длина свободного пробега фононов, м.

Температуропроводность  $a$ , согласно соотношения (87 а), имеет вид:

$$a = \lambda/(c_p) = (C_{\Phi} \cdot L_{\Phi})/3, (m^2/c). \quad (87 \text{ а})$$

Скорость фононов в твердых телах  $C_{\Phi}$  численно равна скорости звука или акустической скорости в материале  $C_A$ , м/с.

Если скорость звука  $C_A$  (м/с) определить из соотношения (86), то длина свободного пробега фононов  $L_{\Phi}$  в твердых телах, строительных, теплоизоляционных материалах и в ограждениях зданий определится из соотношения:

$$L_{\Phi} = 3a/C_A, \text{ м.} \quad (88)$$



*Вывод по 3.11*

Тепло-звуковая аналогия позволяет определять длину свободного пробега фононов в твердых телах и материалах (88) по температурным и тепловым измерениям на поверхности, методом неразрушающего контроля.

### **3.12 Тепловая инерция и тепловая активность**

Тепловая инерция материалов (ограждений зданий) рассчитывается в соответствии с ГОСТ Р 51337–99 [15] по формуле:

$$b = \lambda \cdot (c\rho), \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2), \quad (89)$$

$$\text{или } b = \lambda^2/a. \quad (89 \text{ а})$$

Тепловая инерция  $b$  применяется для определения температуры соприкасающихся поверхностей, а также эргономических параметров, а также для установления предельных температурных показателей горячих поверхностей. Кроме того, в теплофизическом эксперименте используют понятие тепловой активности  $b_*$  материала (вещества), которая численно равна:

$$b_* = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0.5}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}), \quad (90)$$

$$\text{или: } b_* = \lambda \cdot \sqrt{a}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0.5}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}), \quad (90 \text{ а})$$

$$\text{или: } b_* = \sqrt{b}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0.5}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}), \quad (90 \text{ б})$$

$$\text{или: } b = b_*^2. \quad (90 \text{ в})$$

По существу тепловая инерция  $b$  и тепловая активность  $b_*$  очень схожи и отличаются лишь порядком (степенью) произведения теплопроводности  $\lambda$  и объемной теплоемкости  $(c\rho)$ .

Сравнивая (90 б) и (90 в), совершенно очевидно, что для визуального восприятия более предпочтительно значение тепловой активности  $b_*$ , в сравнении с тепловой инерцией  $b$ , так как цифровые значения  $b_*$  не имеют громоздких и значительных размеров (цифр). Физическое понятие этих двух коэффициентов можно объяснить на простом примере.

Предположим, что в среде (комнате) находятся предметы или материалы из различных веществ. Выделим два изделия из металла и дерева, что всегда практически можно использовать для эргономического наблюдения.

В среде (комнате) температура воздуха и предметов находящихся в ней одинаковая. Далее приставим ладони рук одновременно к двум предметам: одну ладонь руки к металлу, а другую ладонь руки — к дереву. Эргономические рецепторы тела человека ощущают металл как более холодное тело, по

сравнению с деревом. Это происходит ввиду того, что тепловая энергия человека более активно или более интенсивно отводится по металлу, чем по дереву, ввиду разной тепловой активности веществ, хотя температура металла и дерева одинаковы.

Для наглядности определим несколько строительных и других материалов, а также металлов имеющих определенные значения удельной плотности  $\rho$ , теплопроводности  $\lambda$ , удельной весовой (массовой) теплоемкости  $c$ , объемной теплоемкости ( $c\rho$ ), температуропроводности  $a$ , а также вычисленные по формулам (89) и (90) значения тепловой инерции  $b$  и тепловой активности  $b_*$ .

В таблице 3.1 приведены физические свойства отдельных строительных, теплоизоляционных материалов и металлов.

Таблица 3.1. Физические свойства отдельных материалов:

удельная плотность —  $\rho$ , теплопроводность —  $\lambda$ , весовая (массовая) теплоемкость —  $c$ , объемная теплоемкость — ( $c\rho$ ), температуропроводность —  $a$ , тепловая инерция —  $b$ , тепловая активность —  $b_*$

Параметр:	$\rho$	$\lambda$	$c$	( $c\rho$ )	$a \cdot 10^6$	$b$	$b_*$
Размерность:	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\frac{\text{кДж}^2}{\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}}$
Строительные материалы							
Бетон	2300	1,28	1,13	2620	0,5	3100	1,7
Дерево дуб $\perp \perp$	800	0,21	1,76	1400	0,15	295	0,55
Мрамор	2700	1,31	0,42	1150	1,15	1500	1,23
Текстолит	1340	0,26	1,34	1780	0,145	460	0,68
Стекло	2500	0,745	0,67	1660	0,45	1230	1,1
Оргстекло	1180	0,2	1,34	1600	0,12	318	0,56
Фторопласт	2200	0,2	0,675	1500	0,13	294	0,54
Кирпич силикат	1950	0,86	1060	1600	0,55	1380	1,16
Металлы							
Алюминий	2670	204	0,92	2530	91,3	$515 \cdot 10^3$	22,6
Бронза	8000	64	0,38	2960	20,8	$190 \cdot 10^3$	13,8
Сталь	7900	45,4	0,462	3620	12,5	$165 \cdot 10^3$	12,5
Чугун	7220	63	0,5	3650	17,4	$224 \cdot 10^3$	15,0
Серебро	10500	458	0,234	2450	186,5	$1130 \cdot 10^3$	33,7

Эргономические характеристики позволяют определить время, в течение которого человек может ощущать температуру горячей или холодной поверхности материала (стенки, трубы, ограждения и т.п.) до определенного температурного ощущения или болевого состояния (болевого порога). Все это очень важно при выполнении работ в строительстве и теплоэнергетике при соприкосновении с материалами повышенной, или наоборот, пониженной температурой.

Из табл. 3.1 видно, что тепловая активность металлов в десятки раз выше, чем у основных строительных и других материалов.

### 3.13 Тепло-звуковая аналогия и модуль упругости Юнга

В твердых строительных материалах и изделиях модуль упругости Юнга  $E_p$  (Па) для соответствующего вида деформаций (продольные, изгибные колебания и т.п.), удельная плотность материала  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) и скорость звука  $C_A$  ( $\text{м}/\text{с}$ ) связаны известным соотношением [26]:

$$C_A = \sqrt{E_p/\rho}, \quad (\text{м}/\text{с}) \quad (91 \text{ а})$$

Если скорость звука  $C_A$  ( $\text{м}/\text{с}$ ) определить из соотношения (86), то модуль упругости Юнга согласно (87) определится по соотношению:

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho, \quad (\text{Па}) \quad (91 \text{ б})$$

*Вывод по 3.13*

Тепло-звуковая аналогия позволяет определять модуль упругости Юнга  $E_p$  (Па) в твердых материалах и изделиях (91 б) по температурным и тепловым измерениям на поверхности, методом неразрушающего контроля.

### 3.14 Общие выводы по главе 3

1. Впервые сформулированы основные положения, понятия и правила тепло-звуковой аналогии, а также приведены теоретические основы тепло-звуковой аналогии в пластине и в ограждении зданий и сооружений.

2. Впервые получена зависимость теплопроводности и волнового числа в пластине при наступлении стационарного теплового режима (20) и (20а), а также для стенки ограждения здания за период 24 часа (21), (21а).

3. Впервые получена формула (20б) для определения времени наступления стационарного теплового режима в пластине по волновому числу.

4. Впервые установлено, что глубина проникновения температурной волны  $L_T$  прямо пропорционально теплопроводности вещества  $a$  и периоду колебаний волны  $z$  (30) и (31).

5. Глубина проникновения звуковой (акустической) волны  $L_A$  прямо пропорционально скорости звука  $C$  и обратно пропорционально частоте звуковых колебаний  $f$  (32).

6. Тепло-звуковая аналогия позволяет определять с какой частотой звука  $f_*$  и долей проникновения волн  $H_A$ , звуковая волна проникает на заданную глубину  $L_A$  пластины или ограждения зданий (33).

7. Очевидно, что волновое число  $k$  и доля проникновения  $\theta$  обратно пропорциональны, т.е.: чем больше волновое число  $k$ , и соответственно больше комплекс  $H$ , тем меньше доля проникновения и больше доля поглощения волн (28).

8. Чем больше плотность материала и объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), тем больше поглощение и меньше проникновение волн, больше волновое число  $k$  и наоборот.

9. Разработана методика определения волнового числа в пластине при любой доле проникновения гармонических колебаний, что имеет огромное практическое значение для экспериментальных исследований.

10. Установлены закономерности (34), (34 а), (34 б) которые являются универсальными для оценки начала упорядоченной части процесса симметричного нагрева (охлаждения), то есть могут быть использованы при любых граничных условиях и при любой интенсивности процесса теплообмена на границе тел различной формы. Закономерности гарантируют наступление начала упорядоченного теплового периода нагрева с погрешностью в 1 %. Параметр  $\xi$  равен: 1; 2; 2,2; 2,5; 3 — соответственно для пластины, цилиндра, призмы квадратного сечения, куба и шара.

11. Установлена закономерность (34 в) для оценки начала упорядоченной части процесса несимметричного нагрева (охлаждения) пластины, которая гарантирует долю проникновения температурной волны с погрешностью в 1 %:  $\theta_T = 0,243$  ( $H_T = 1,414$ ).

12. Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра призмы квадратного сечения (35 а) или куба (35 б) по поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра, не проникая с термопарой внутрь их объема и не нарушая их целостность. При этом нет необходимости знать такие теплофизические характеристики вещества, как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, плотность. Причем при нагреве или охлаждении тел нет необходимости знать значения критерия Фурье, а также проникать с термопарой в центральную часть объема тела.

13. Безразмерный коэффициент звукопроводности  $\alpha_{пр}$  характеризует долю отношения прошедшей через пластину (перегородку, стену) энергии звуковой волны, к энергии падающей звуковой волны на наружную поверхность

ограждения (пластины, перегородки) и зависит от толщины ограждения  $\delta$ , скорости звука  $C_A$  и частоты звуковых колебаний  $f$ .

14. Коэффициент звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  меньше, и следовательно более эффективней, с увеличением толщины ограждения (пластины)  $\delta$ , уменьшением скорости звука  $C_A$  и увеличением частоты звуковых колебаний  $f$ .

15. С уменьшением коэффициента звукопроводности  $\alpha_{\text{пр}}$  звукоизоляция  $R_W$  (в децибелах) увеличивается, и будет считаться (становится) более энергоэффективной (например, в процессе производства звукоизоляции) или более энергоэффективной (в процессе эксплуатации).

16. Впервые установлены соотношения (43), которые позволяют определять термоизоляцию  $R_{\text{ТЕРМ}}$  или волновое температурное число  $k_T$  в пластине или стене ограждения здания, а также установить, что термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  более эффективна при большей толщине пластины  $\delta$  и меньшей теплопроводности вещества  $a$ .

17. Безразмерный коэффициент теплопроводности  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  характеризует долю отношения прошедшей через стену (пластину, перегородку) энергии температурной волны (Дж), к энергии, поступающей на наружную поверхность ограждения (пластины) и зависит от толщины ограждения  $\delta$ , а также от волнового температурного числа  $k_T$  в пластине или стене ограждения здания.

18. Волновое температурное число  $k_T^{\text{СТ}}$  в стене ограждения здания, зависит от теплопроводности вещества  $a$  (21) и от периода колебаний температурной волны  $z$ . Волновое температурное число  $k_T^{\text{ПЛ}}$  в пластине, зависит от теплопроводности вещества  $a$  (20) и времени наступления стационарного теплового режима  $\tau_*$ .

19. Теплопроводность  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  становится меньше, и следовательно более эффективней, с увеличением толщины  $\delta$  пластины (ограждения), уменьшением теплопроводности вещества  $a$ .

20. С уменьшением теплопроводности  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$ , термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (в децибелах) увеличивается и будет считаться (становится) более энергоэффективной (например, в процессе производства термоизоляции) или более энергоэффективной (в процессе эксплуатации).

21. При одинаковой толщине пластины  $\delta$  и коэффициента теплопроводности  $a$ , звукоизоляция  $R_W$  зависит от частоты звуковых колебаний  $f$ , а термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  — от времени наступления стационарного теплового режима  $\tau_*$  в пластине или периода колебаний температурной волны  $z$  в стене ограждения здания.

22. Любой избыточный температурный потенциал пластины, ограждения здания, изделия в течение времени выравнивается и приводит к термодинамическому равновесию тела, снижает волновое число  $k_T$ , и следовательно снижается термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ .

23. Впервые установлена связь между плотностью теплового потока, амплитудой температурной волны, коэффициентом теплоусвоения, волновым числом, а также теплофизическими свойствами (теплопроводность, теплопроводность, объемная теплоемкость).

24. Соотношения (50), (51), (52), (53), (54) и (55) получены впервые и имеют огромное значение для экспериментального определения теплопроводности, теплоусвоения, теплопроводности, объемной теплоемкости материалов на образцах — пластинах, в стадиях упорядоченного и стационарного теплового режима, а также и при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины.

25. Впервые установлено, что если получено волновое число для конкретного времени нагрева в пластине, согласно (52):  $k_T^{\text{пл}} = H/\delta$ , то теплопроводность для пластины в области упорядоченного ( $\tau_\theta$ ) и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины, а также в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) охлаждении и нагреве поверхности, определяется по формуле (55):  $\lambda = B/1,414 k_T^{\text{пл}} = 0,707 (B/k_T^{\text{пл}}) \approx 0,71 (B/k_T^{\text{пл}}) \approx 0,71 (B/k_T^{\text{СТ}})$ .

26. Впервые установлено, что для пластины в стадии максимального теплового потока  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$ , то есть в момент наступления упорядоченного теплового режима, объемная теплоемкость пластины согласно (50 а), определяется по формуле:  $(c\rho) = (B^2 \cdot \tau_p)/(2\pi \cdot \lambda)$ , а теплопроводность пластины, согласно (50 б) определяется по формуле:  $a = \pi /[\tau_p (k_T^{\text{пл}})^2]$ .

27. Впервые установлено, что для пластины в стадии стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), а также и в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) охлаждении и нагреве наружной поверхности, безразмерный комплекс  $H$ , включающий волновое температурное число  $k_T^{\text{пл}}$ , численно равен:  $H = k_T^{\text{пл}} \cdot \delta = 1,414$ .

28. Впервые установлено, что при нагреве пластины в момент наступления стационарного теплового режима, теплопроводность, согласно (53 а), (53 в), имеет вид:  $a = 0,8 (\delta^2/\tau_*)$ , а число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_*)/\delta^2 = 0,8$ .

29. Впервые получены соотношения (56 б) и (56 в) для пластины, которые позволяют определять коэффициент теплоусвоения и теплопроводность пластины в момент наступления стационарного теплового режима:

$$B = 2/R_{\text{ПЛ}}; \lambda = 0,5 (B \cdot \delta).$$

30. Впервые установлено, что для пластины в стадии упорядоченного и стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), а также и в ограждении зданий, при циклическом (в течение суток) нагреве и охлаждении наружной поверхности, согласно (54) и (55) волновое температурное число  $k_T^{пл}$  или  $k_T^{ст}$ , коэффициент теплоусвоения  $B$  и теплопроводности  $\lambda$ , связаны соотношением:

$$k_T^{пл} = k_T^{ст} = 0,707 (B/\lambda).$$

31. Математический эксперимент позволил установить зависимости для определения удельной плотности теплового потока на поверхности тел, материалов и ограждений зданий и сооружений (57 а) и (57 б).

32. Впервые получено теоретическое и графическое распределение термического напряжения в пластине (рис. 3.4), а также получены зависимости термического напряжения на поверхности пластины, при нагреве до момента наступления стационарного теплового режима (60) и (63).

33. Впервые получены зависимости термического напряжения на поверхности ограждения здания, при циклическом подводе теплоты в течение суток, (64) и (65).

34. Установлено, что чем выше теплоусвоение материала пластины или стены  $B$ , тем выше в нем термическое напряжение на поверхности  $\psi_{пл}$ .

35. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{пл}^{пл}$  при нагреве тепловым потоком  $q_{пл}^{max}$ , численно пропорционально коэффициенту теплоусвоения  $B$  и имеет размерность, (Па · м), (60).

36. Термическое напряжение на поверхности ограждения здания  $\psi_{пл}^{ст}$ , при циклическом подводе теплового потока  $q_{пл}$  за сутки, численно пропорционально половинному значению коэффициента теплоусвоения  $B$  и имеет размерность, (Па · м), (65).

37. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{пл}^{пл}$ , при ее нагреве до стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ), обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{пл}$  (63).

38. Термическое напряжение на поверхности ограждения здания  $\psi_{пл}^{ст}$ , при максимальном значении плотности теплового потока, обратно пропорционально четверти термического сопротивления теплопроводности стены  $R_{ст}$  (66).

39. Проведенный математический эксперимент позволяет установить, что поверхностная плотность  $\rho_{пл}$  (кг/м<sup>2</sup>), удельная плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), толщина образца (изделия), пластины, перегородки, ограждения здания  $\delta$  (м), связаны соотношением:  $\rho_{пл} = \rho \cdot \delta$ , или  $\rho = \rho_{пл}/\delta$ .

40. Установлено, что при прохождении температурной или звуковой волны через один квадратный метр поверхности, на один погонный метр тол-

щины (глубины), то есть, через один метр толщины образца (изделия), поверхностная и удельная плотность материала (вещества) равны численно, а именно:  $\rho_{\Pi} = \rho$  (при  $\delta = 1$  м).

41. Впервые получено соотношение (70), которое позволяет определять поверхностную плотность ограждения здания  $\rho_{\Pi}$  по значению термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , то есть:  $\rho_{\Pi} = 50 R_{\text{ТЕРМ}}$ , а следовательно и удельную плотность ограждения здания  $\rho$  по формуле (67):  $\rho = \rho_{\Pi}/\delta$ .

42. Впервые сформулировано правило плоской температурной волны: поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , проходящей через твердое тело, уменьшается пропорционально увеличению поверхностной плотности вещества, а при численном равенстве удельной и поверхностной плотности (то есть, при толщине пластины  $\delta = 1$  м), поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с), соответственно при  $\delta = 1$  м, численно пропорциональна теплопроводности вещества  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), т.е. устанавливается соотношение:  $S_{\Pi}^* = a$ , при  $\delta = 1$  м; или:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м}$ .

43. Из правила температурной волны впервые сформулирован новый физический смысл теплопроводности вещества (материала): теплопроводность вещества  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) характеризует поверхностную скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с) на глубине (толщине пластины)  $\delta = 1$  м, в момент наступления стационарного теплового режима ( $\tau_*$ ).

44. Впервые установлены соотношения (74), (75), (76), (77), связывающие поверхностную скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , теплопроводность  $a$ , теплопроводность  $\lambda$ , объемную теплоемкость ( $c\rho$ ), удельную весовую теплоемкость ( $c$ ) и поверхностную плотность материала  $\rho_{\Pi}$ .

45. Впервые сформулировано определение плотности тепловой энергии и установлены соотношения (78), (80), (81) и (82), связывающие: плотность тепловой энергии  $E_{\text{T}}$ , объемную теплоемкость ( $c\rho$ ), максимальную разность температур на поверхностях пластины  $\Delta T_*$  в стационарном тепловом режиме, плотность теплового потока на поверхности пластины  $q_{\Pi}^{\text{max}}$ , поверхностную скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ .

46. Впервые установлен закон температурной волны на основе тепло-звуковой аналогии (83).

47. Впервые определено и сформулировано безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{К}}$  (84), которое устанавливает зависимость (связь) между поверхностной скоростью температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с) и звуковой (акустической) скоростью в материале  $C_{\text{А}}$  (м/с).

48. Тепло-звуковая аналогия позволяет определять скорость звука в материалах по температурным и тепловым измерениям на поверхности, методом неразрушающего контроля.



49. Тепло-звуковая аналогия позволяет определять длину свободного пробега фононов в твердых телах и материалах (88) по температурным и тепловым измерениям на поверхности, методом неразрушающего контроля.

50. Тепло-звуковая аналогия позволяет определять модуль упругости Юнга  $E_p$  (Па) в твердых материалах и изделиях (91 б) по температурным и тепловым измерениям на поверхности, методом неразрушающего контроля.

51. Приведены понятия, физический смысл тепловой инерции и тепловой активности, а также приведены ТФС отдельных материалов и металлов.

## ГЛАВА 4 ЗАКОН ТЕМПЕРАТУРНОГО ОЩУЩЕНИЯ И ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### 4.1 Тепло-звуковая аналогия и основы температурного ощущения

Воспринимаемый слухом человека частотный диапазон ограничен снизу частотой 16...20 Гц, а сверху — частотой 20000 Гц. Минимальный порог слышимости (п.с.) определяется на частоте 3000 Гц при интенсивности звука  $J_{\text{пс}} = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> (шепот), а по уровню — 0 дБ. Увеличение уровня интенсивности звука приводит к появлению ощущения боли, наступает болевой порог, который на максимуме составляет по уровню — 120 дБ, а по интенсивности энергии звука  $J = 1$  Вт/м<sup>2</sup>.

Динамический диапазон по уровням звука от порога слышимости до болевого порога равен 130 дБ, в диапазоне частот от 20 до 20000 Гц. Для математического эксперимента обозначим уровень ощущения —  $E$ , соответственно:  $E_T$  — уровень температурного ощущения,  $E_A$  — уровень звукового (акустического) ощущения,  $J, J_i$  — интенсивность энергии звука, Вт/м<sup>2</sup>.

На основе наблюдений Эрнста Вебера экспериментально с 1834 г, Густав Фехнер в 1860 г сформулировал закон ощущения звука [26]: слуховое ощущение пропорционально логарифму раздражающей силы:

$$E_A = a \cdot \lg (J_i/J_{\text{пс}}), \quad (92)$$

где:  $a$  — коэффициент;  $J_{\text{пс}}$  — раздражающая сила (интенсивность звука) на пороге слышимости, равна  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $J_i$  — интенсивность звука, Вт/м<sup>2</sup>.

При  $a = 10$ , уровень звукового ощущения выражается в децибелах:

$$E_A = 10 \cdot \lg (J_i/J_{\text{пс}}), \quad (93)$$

Уровень звукового ощущения в дБ, определяется по формуле:

$$E_A = E_i - E_{\text{пс}}, \quad (94)$$

где:  $E_i$  — уровень ощущения звука и  $E_{\text{пс}}$  — уровень порога слышимости, дБ.

При интенсивности звука  $J_i = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>, согласно (93), уровень ощущения  $E_A = 0$  дБ, что и определяет минимальный порог слышимости  $E_{\text{пс}} = 0$ . Соответственно:

при  $J_i = 10^{-10}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $E_A = 20$  дБ;

при  $J_i = 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $E_A = 40$  дБ;

при  $J_i = 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $E_A = 60$  дБ; и т.д.

То есть, уровень ощущения звука в децибелах:

$$E_A = 10 \cdot \lg J_i + 120. \quad (95)$$

Следовательно, уровень звукового ощущения  $E_A$  представляет собой уровень над минимальным порогом слышимости  $E_{\text{пс}} = 0$ , то есть определяет относительный уровень звукового ощущения.

Аналогично, рука и тело человека обладает свойствами температурного анализатора. Тело человека состоит из большого числа нервных окончаний, каждое из которых возбуждается от прикосновения к ним среды с другой, отличной от тела человека температурой и посылает в мозг нейронные электрические импульсы. Там эти импульсы подвергаются сложному анализу, в результате которого человек определяет передаваемое сообщение. Кроме того, каждый человек, как индивидуум (адепт), по разному воспринимает температурные импульсы. Одни люди пьют холодную воду и для них это норма, а другие пьют кипятком и считают это нормой. Одни купаются в проруби зимой, другие же выдерживают горячую воду с температурой  $55 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Воспринимаемый телом человека диапазон температур можно установить число условно. Так, например, для спортивного плавания в бассейне установлена оптимальная температура воды  $26 \dots 28 \text{ }^\circ\text{C}$ . При большей температуре происходит перегрев тела человека (спортсмена, рабочего), а при меньшей температуре и при длительном пребывании — переохлаждение. При соприкосновении тела человека с твердой поверхностью с температурой отличной от человека, много зависит от тепловой активности материала и силой контакта (легкое или сильное прикосновение).

Температура тела человека также имеет разную температуру (рука, нога, голова и т.п.). Но точно можно утверждать, что увеличение амплитуды колебания температуры окружающей среды (воды, воздуха, стенки и т.п.) в большую или меньшую сторону от комфортного ощущения приводит вначале к дискомфорту, затем к появлению ощущения боли, а в конечном итоге — наступает болевой порог.

Установим порог температурного комфортного ощущения:  $t_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Установим минимальный порог температурного ощущения человека:  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует переходному климатологическому режиму (зимний — летний), а максимальный порог температурного ощущения:  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тогда амплитуда колебания температурного ощущения  $\vartheta_K$ , относительно температурного комфортного ощущения:  $t_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , составит:

$$\vartheta_K = t_K - 10 = 20 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ а также } \vartheta_K = 50 - t_K = 50 - 30 = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Сформулируем закон *температурного ощущения* (автор Фокин В. М. и Тинякова И. Г.): температурное ощущение человека пропорционально логарифму раздражающей температуры:

$$E_T = a \cdot \lg [(t_K + \vartheta_K)/t_K], \text{ дБ}, \quad (96)$$

где:  $a$  — коэффициент;  $t_K$  — температура комфортного ощущения,  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\vartheta_K$  — амплитуда колебания раздражающего температурного ощущения,  $^\circ\text{C}$ . Если принять коэффициент  $a = 10$ , а за температуру болевого ощущения принять амплитуду температур  $\vartheta_K = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , то есть  $\pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$  от  $t_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , т.е. соответственно при  $+10 \text{ }^\circ\text{C}$  и при  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ , относительно  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , то закон температурного ощущения (96) для уровня болевого ощущения будет иметь вид в децибелах:

$$E_{ТБ} = 10 \lg [(t_K + \vartheta_K)/t_K], \quad (97)$$

$$E_{ТБ} = 10 \lg [(30 + 20)/30] = 10 \lg (50/30),$$

$$E_{ТБ} = 10 \lg (1,666) = 10 \cdot 0,222 = 2,22 \text{ дБ}. \quad (97 \text{ а})$$

То есть, уровень болевого порога температурного ощущения человека, относительно минимального порога температурного комфортного ощущения  $t_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , составляет  $\pm 2,22 \text{ дБ}$ , т.е.:  $E_{ТБ} = \pm 2,22 \text{ дБ} = |2,22| \text{ дБ}$ .

Минимальный порог температурного комфортного ощущения, соответственно при  $t_K = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\vartheta_K = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , равен нулю:

$$E_{ТК} = 10 \lg [(30 + 0)/30] = 10 \lg 1 = 0 \text{ дБ}. \quad (98)$$

Следовательно, любой уровень температурного ощущения  $E_T$  (дБ) представляет собой уровень (по абсолютному значению) над минимальным порогом комфортного температурного ощущения  $E_{ТК} = 0 \text{ дБ}$ , т.е. определяет относительный уровень температурного ощущения.

Ранее, в разделе 3.4, установлено, что:

— термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  более эффективна при большей толщине изделия  $\delta$ , меньшей температуропроводности вещества  $a$ ;

— любой избыточный температурный потенциал в течение времени  $t$  выравнивается и температурное равновесие снижает волновое число  $k_T$ , а следовательно снижается термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  изделия, пластины.

Объединяя полученные заключения по температурному ощущению человека и термоизоляции, установим правила критического уровня температурного ощущения человека.

### *Правила критического уровня температурного ощущения*

1. Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (в децибелах) будет считаться рентабельной для комфортного ощущения человека, при значении  $R_{\text{ТЕРМ}}$  большим относительного уровня температурного ощущения 2,22 дБ, то есть:

$$R_{\text{ТЕРМ}} > 2,22 \text{ дБ.}$$

2. Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  для комфортного температурного ощущения будет эффективнее (выше) при большей толщине  $\delta$  (м) материала (вещества) и меньшей теплопроводности  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Правила критического уровня температурного ощущения позволяют установить, что с точки зрения термоизоляции, относительный уровень начала температурного ощущения имеет вид:

$$E_{\text{T}} = (R_{\text{ТЕРМ}} - 2,22), \text{ дБ.} \quad (99)$$

Следовательно, абсолютно точно можно установить, что пока существует материал (назовем его «изолятор») определенной толщины  $\delta$  и с теплопроводностью  $a$ , термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  которого более  $E_{\text{T}} = 2,22$  дБ, то есть при условии:  $R_{\text{ТЕРМ}} > 2,22$  дБ, человек защищен от избыточной температуры  $\theta_{\text{к}}$  и пребывает в комфортных температурных условиях.

Но в течении времени термоизоляция будет снижаться и достигнет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 2,22$  дБ, и в это время человек начнет постепенно ощущать температурное воздействие, а относительный уровень температурного ощущения  $E_{\text{T}}$  в этот момент времени, согласно (99), будет равен нулю, то есть  $E_{\text{T}} = 0 = E_{\text{ТК}}$ .

При дальнейшем снижении термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$  до нуля, температурное ощущение  $E_{\text{T}}$  будет приближаться к уровню болевого порога, а при относительном уровне температурного ощущения  $E_{\text{T}} = (- 2,22) \text{ дБ} = | 2,22 \text{ дБ} |$ , наступает болевой порог температурного ощущения:  $E_{\text{T}} = | 2,22 \text{ дБ} | = E_{\text{ТБ}}$ .

Ранее, в разделе 3.4, установлено, что: термоизоляция стены, перегородки, пластины определяется в децибелах по формуле (41):

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ТЕРМ}}), \text{ дБ.}$$

Также в разделе 3.4, установлено, что если известна термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , то теплопроводность определится по формуле (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}}.$$

Сравнивая выражение (41) и (97) совершенно очевидно, что при термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}} = 2,22$  дБ, наблюдается соотношение для теплопроводности:

$$1/\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 1,666 \text{ или } \alpha_{\text{ТЕРМ}} = 0,6 \text{ или } \alpha_{\text{ТЕРМ}} = 60 \%.$$

Согласно выражения (26), (27) и (27 а), теплопроводность соответствует доле проникновения температурной волны 60 %, т.е.:

$$\theta = 0,6 \text{ (60 \%)}, \text{ а обратное значение: } \theta^{-1} = 1,666.$$

То есть, в этом случае имеем слой 60 % проникновения и 40 % поглощения гармонических температурных колебаний. Тогда согласно методики расчета волнового числа по температурам тела (разд. 3.2), имеем:

$$e^{kx} = \theta^{-1} = 1,666.$$

После логарифмирования получим:

$$(k \cdot x) \cdot \lg e = \lg 1,666 = 0,222, \text{ или}$$

$$H \cdot M = 0,222, \text{ а соответственно:}$$

$$H = 0,222/0,434 = 0,51.$$

Следовательно, при относительном уровне температурного ощущения  $E_T = 2,22$  дБ, имеем безразмерный волновой комплекс:  $H = 0,51$ .

Проведенный математический эксперимент позволяет для определенного и любого материала (для дальнейших расчетов назовем его «изолятор») определять следующие параметры.

1. Эргономическое время  $\tau_3$  наступления относительного уровня температурного ощущения, а именно:

а) для уровня температурного комфортного ощущения:  $E_T = 0 = E_{TK}$ ;

б) для уровня болевого порога температурного ощущения человека: когда  $E_T = |2,22 \text{ дБ}| = E_{TB}$ .

2. Толщину  $\delta$  (м) «изолятора», для обеспечения комфортного температурного ощущения, при  $E_T = 0 = E_{TK}$  и более нулевого уровня.

#### 4.2 Задачи и правила определения температурного ощущения

Задачи по определению температурного ощущения человека решаются по одному из алгоритмов.

1. Если известна термоизоляция материала  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ), толщина «изолятора»  $\delta$  (м), теплопроводность  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), то соответствующее эргономическое время  $\tau_3$  (с) определяющее уровень температурного ощущения человека, согласно (20 б), будет равно:

$$\tau_3 = \pi / [2a (k_T)^2], \text{ с,} \tag{100}$$

где  $k_T$  — волновое температурное число, равное  $k_T = H/\delta$ , ( $\text{м}^{-1}$ ).

2. Если известна термоизоляция материала  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ), коэффициент температуропроводности «изолятора»  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), время в течение которого требуется обеспечить комфортное температурное ощущение  $\tau_3$  (с), то соответствующая толщина «изолятора»  $\delta$  (м) обеспечивающая это комфортное температурное ощущение будет равна:

$$\delta = H/k_T = H/\sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_3)}, \text{ м}, \quad (101)$$

где  $k_T$  — волновое число, равное согласно (20):  $k_T = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_3)}$ , ( $\text{м}^{-1}$ ).

3. Безразмерный волновой комплекс  $H = kx = k\delta = 0,51$  определяет только относительный уровень температурного ощущения  $E_T = 2,22$  дБ, а во всех остальных случаях безразмерный комплекс  $H$  определяется по одному из соотношений (28).

4. При любом относительном уровне температурного ощущения  $E_T$  (дБ) или термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ), волновое число  $k_T$  определяется по методике приведенной в разделе 3.2, а именно:

а) соотношения (43) получены впервые и позволяют определять волновое число, термоизоляцию «изолятора» или толщину «изолятора»:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot \delta), \text{ м}^{-1}, \quad (102 \text{ а})$$

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T \cdot \delta), \text{ дБ}; \quad (102 \text{ б})$$

$$\delta = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot k_T), \text{ м}. \quad (102 \text{ в})$$

б) если же, наоборот, известно волновое число  $k_T$  или термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , то соотношения (40) и (42) позволяют определять термопроводность «изолятора»:

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-M \cdot k_T \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_T \cdot \delta}, \quad (102 \text{ г})$$

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}}. \quad (102 \text{ д})$$

5. Согласно закона температурного ощущения (96), относительный уровень температурного ощущения  $E_T$  определяется для любой раздражающей температуры среды  $t_c$  или амплитуды колебания раздражающего температурного ощущения  $\vartheta_k$ . Тогда абсолютно точно можно установить:

а) эргономическое время до начала наступления температурного ощущения человека  $\tau_3$ , определяется по формуле (100), но при термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$  обеспечивающей начало наступления температурного ощущения человека, которое согласно (99) будет иметь вид:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = (E_T + 2,22), \text{ дБ}. \quad (103 \text{ а})$$

б) эргономическое время до болевого порога человека  $t_{\text{Э}}$ , определяется по формуле (100), но при термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , не обеспечивающей комфортное температурное ощущение человека, а напротив — определяет болевой порог, которое согласно (99) будет иметь вид:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = E_{\text{T}}, \text{ дБ.} \quad (103 \text{ б})$$

в) эргономическое время от начала наступления температурного ощущения до болевого порога  $t_{\text{Э}}$ , определяется по формуле (100), но при термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающей уровень болевого порога температурного ощущения человека, относительно минимального порога температурного комфортного ощущения  $t_{\text{К}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , и составляет 2,22 дБ, т.е.:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 2,22 \text{ дБ.} \quad (103 \text{ в})$$

### 4.3 Примеры определения температурного ощущения человека

Примеры по определению температурного ощущения человека решаются по одному из алгоритмов.

Пример 1. Допустим, имеется среда или массивное тело (стенка, трубопровод) с температурой на поверхности  $t_{\text{С}} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тогда амплитуда колебания раздражающего температурного ощущения (относительно  $t_{\text{К}} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для человека составит  $\vartheta_{\text{К}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Согласно закона температурного ощущения (96), уровень температурного ощущения  $E_{\text{T}}$  (дБ) для тела человека составит:

$$\begin{aligned} E_{\text{T}} &= 10 \lg [(t_{\text{К}} + \vartheta_{\text{К}})/t_{\text{К}}] = 10 \lg [(30 + 70)/30] = \\ &= 10 \lg 3,33 = 10 \cdot 0,52 = 5,2 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

В связи с этим возможно установить следующие параметры термоизоляции.

А) Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека, согласно (103 а), будет иметь вид:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = E_{\text{T}} + 2,22 = 5,2 + 2,22 = 7,42 \text{ дБ.}$$

Б) Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог человека, согласно (103 б), будет иметь вид:

$$R_{\text{ТЕРМ}} = E_{\text{T}} = 5,2 \text{ дБ.}$$



Выберем для условного «изолятора» толщину  $\delta = 0,01$  м ( $\delta = 1$  см) и температуропроводность  $a = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Тогда можно:

а) определить волновое число для «изолятора»  $k_T$ , по формуле (102 а), которое при соответствующей термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ):

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta), \text{ м}^{-1},$$

б) установить соответствующее эргономическое время  $\tau_{\text{Э}}$  (с), по формуле (100), определяющее уровень температурного ощущения человека, если известна температуропроводность «изолятора»  $a$  (м<sup>2</sup>/с) и волновое число  $k_T$ :

$$\tau_{\text{Э}} = \pi / [2a (k_T)^2], \text{ с.}$$

Проведем расчеты для соответствующего состояния тела человека.

А) Вычисляется волновое число  $k_T$  (м<sup>-1</sup>) и эргономическое время  $\tau_{\text{Э}}$  (с), когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 7,42$  дБ. Соответственно:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta) = 7,42 / (4,34 \cdot 0,01) = 171 \text{ м}^{-1},$$

$$\tau_{\text{Э}} = \pi / [2a (k_T)^2] = 3,14 / [2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} (171)^2] = 537 \text{ с.}$$

Б) Вычисляется волновое число  $k_T$  (м<sup>-1</sup>) и эргономическое время  $\tau_{\text{Э}}$  (с), когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 5,2$  дБ. Соответственно:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta) = 5,2 / (4,34 \cdot 0,01) = 120 \text{ м}^{-1},$$

$$\tau_{\text{Э}} = \pi / [2a (k_T)^2] = 3,14 / [2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} (120)^2] = 1090 \text{ с.}$$

Следовательно, при соприкосновении тела человека с поверхностью имеющей температуру  $t_c = 100$  °С, на которую нанесен «изолятор» с толщиной  $\delta = 1$  см (0,01 м) и температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, тело человека начнет ощущать температуру через  $\tau_{\text{Э}} = 537$  с, а через  $\tau_{\text{Э}} = 1090$  с, получит ощущение болевого порога.

Пример 1а. Допустим, что при тех же условиях, то есть с температурой на поверхности  $t_c = 100$  °С и температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, толщина условного «изолятора» в 10 раз меньше:  $\delta = 0,001$  м ( $\delta = 1$  мм). Тогда после расчета получим:

— уровень температурного ощущения:  $E_T = 5,2$  дБ;

— термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 7,42$  дБ;

— термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 5,2$  дБ;

— волновое число  $k_T$  и эргономическое время  $\tau_{\text{Э}}$ , когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 7,42$  дБ, то соответственно:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta) = 7,42 / (4,34 \cdot 0,001) = 1710 \text{ м}^{-1},$$

$$\tau_{\text{Э}} = \pi / [2a (k_T)^2] = 3,14 / [2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} (1710)^2] = 5,37 \text{ с} \approx 5,4 \text{ с};$$

— волновое число  $k_T$  и эргономическое время  $\tau_{\text{Э}}$ , когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 5,2$  дБ, то соответственно:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta) = 5,2 / (4,34 \cdot 0,001) = 1200 \text{ м}^{-1},$$

$$\tau_{\text{Э}} = \pi / [2a (k_T)^2] = 3,14 / [2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} (1200)^2] = 10,9 \approx 11 \text{ с}.$$

Следовательно, при соприкосновении тела человека с поверхностью имеющей температуру  $t_c = 100$  °С, на которую нанесен «изолятор» с толщиной  $\delta = 1$  мм (0,001 м) и температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, тело человека начнет ощущать температуру через  $\tau_{\text{Э}} = 5,4$  с, а через  $\tau_{\text{Э}} = 11$  с, получит ощущение болевого порога.

**Пример 2.** Допустим, имеется среда или массивное тело (стенка, трубопровод) с температурой на поверхности  $t_c = (-10)$  °С. Тогда амплитуда колебания раздражающего температурного ощущения (относительно  $t_k = 30$ °С) для тела человека составит  $\vartheta_k = 40$  °С.

Выберем для условного «изолятора» толщину  $\delta = 0,001$  м ( $\delta = 1$  мм), с температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с. Тогда после расчета получим:

— согласно закона температурного ощущения (96), уровень температурного ощущения  $E_T$  (дБ) для тела человека составит:

$$E_T = 10 \lg [(t_k + \vartheta_k) / t_k] = 10 \lg [(30 + 40) / 30] =$$

$$= 10 \lg 2,33 = 10 \cdot 0,368 = 3,7 \text{ дБ};$$

— термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 3,7 + 2,22 = 5,92$  дБ;

— термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 3,7$  дБ;

— волновое число  $k_T$  и эргономическое время  $\tau_{\text{Э}}$ , когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 5,92$  дБ, то соответственно:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta) = 5,92 / (4,34 \cdot 0,001) = 1364 \text{ м}^{-1},$$

$$\tau_{\text{Э}} = \pi / [2a (k_T)^2] = 3,14 / [2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} (1364)^2] = 8,4 \text{ с};$$

— волновое число  $k_T$  и эргономическое время  $\tau_3$ , когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 3,7$  дБ, соответственно:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta) = 3,7 / (4,34 \cdot 0,001) = 853 \text{ м}^{-1},$$

$$\tau_3 = \pi / [2a (k_T)^2] = 3,14 / [2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} (853)^2] = 21,6 \text{ с.}$$

*Следовательно*, при соприкосновении тела человека с поверхностью имеющей температуру  $t_c = (-10)^\circ\text{C}$ , на которую нанесен «изолятор» с толщиной  $\delta = 1$  мм (0,001 м) и температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , тело человека начнет ощущать температуру через  $\tau_3 = 8,4$  с, а через  $\tau_3 = 21,6$  с, получит ощущение болевого порога.

Пример 3. Допустим, имеется среда или массивное тело (стенка, трубопровод) с температурой на поверхности  $t_c = 20^\circ\text{C}$  или  $t_c = 40^\circ\text{C}$ . В обоих случаях амплитуда колебания раздражающего температурного ощущения (относительно  $t_k = 30^\circ\text{C}$ ) для тела человека составит  $\vartheta_k = 10^\circ\text{C}$ . Выберем для условного «изолятора» толщину  $\delta = 0,001$  м ( $\delta = 1$  мм) и с температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Тогда после расчета получим:

— согласно закона температурного ощущения (96), уровень температурного ощущения  $E_T$  (дБ) для тела человека составит:

$$E_T = 10 \lg [(t_k + \vartheta_k) / t_k] = 10 \lg [(30 + 10) / 30] =$$

$$= 10 \lg 1,33 = 10 \cdot 0,125 = 1,25 \text{ дБ};$$

— термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 1,25 + 2,22 = 3,47$  дБ;

— термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог  $R_{\text{ТЕРМ}} = 1,25$  дБ;

— волновое число  $k_T$  и эргономическое время  $\tau_3$ , когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 3,47$  дБ, то соответственно:

$$k_T = R_{\text{ТЕРМ}} / (4,34 \cdot \delta) = 3,47 / (4,34 \cdot 0,001) = 800 \text{ м}^{-1},$$

$$\tau_3 = \pi / [2a (k_T)^2] = 3,14 / [2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} (800)^2] = 24,5 \text{ с};$$

— эргономическое время  $\tau_3$ , когда термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог человека, составляет  $R_{\text{ТЕРМ}} = 1,25$  дБ, соответственно не имеет места, ввиду того что  $R_{\text{ТЕРМ}} = 1,25 \text{ дБ} < 2,22 \text{ дБ}$ .

*Следовательно*, при соприкосновении человека с поверхностью имеющей температуру  $t_c = 20^\circ\text{C}$  или  $t_c = 40^\circ\text{C}$ , на которую нанесен «изолятор» с толщиной  $\delta = 1$  мм (0,001 м) и температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,

тело человека начнет ощущать температуру (либо более холодную, либо более нагретую, относительно  $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) через  $\tau_3 = 24,5 \text{ с}$ , а ощущение болевого порога человек не получит.

**Пример 4.** Допустим, имеется твердая среда или массивное тело (стенка, трубопровод) с температурой на поверхности  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Амплитуда колебания раздражающего температурного ощущения (относительно  $t_k = 30^\circ\text{C}$ ) для тела человека в этом случае составит  $\vartheta_k = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Требуется определить толщину «изолятора»  $\delta$  (м), с теплопроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , чтобы за время  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ , обеспечить:

— толщину «изолятора», которая защитит человека от раздражающей температуры среды (стенки, трубопровода)  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , до начала наступления температурного ощущения человека, за время  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ ;

— толщину «изолятора», которая защитит человека от раздражающей температуры среды (стенки, трубопровода)  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , до болевого порога человека, за время  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ ;

— толщину «изолятора», которая защитит человека от раздражающей температуры среды (стенки, трубопровода)  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , от начала наступления температурного ощущения человека, до болевого порога человека, за время  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ .

Согласно закона температурного ощущения (96), уровень температурного ощущения  $E_T$  (дБ) для тела человека составит:

$$\begin{aligned} E_T &= 10 \lg [(t_k + \vartheta_k)/t_k] = 10 \lg [(30 + 80)/30] = \\ &= 10 \lg 3,67 = 10 \cdot 0,563 = 5,63 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая начало наступления температурного ощущения человека составит:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 5,63 + 2,22 = 7,85 \text{ дБ}$ .

Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , определяющая болевой порог:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 5,63 \text{ дБ}$ .

Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , обеспечивающая уровень болевого порога температурного ощущения человека, относительно минимального порога температурного комфортного ощущения  $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , составляет:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 2,22 \text{ дБ}$ .

Согласно (20), и при  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ , волновое число «изолятора» равно:

$$k_T = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_3)} = \sqrt{3,14/2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 100} = 396 \text{ (м}^{-1}\text{)}.$$

Толщина «изолятора» определяется согласно (102 в):

$$\delta = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot k_T), \text{ м.}$$

Расчеты позволяют получить соответствующую толщину «изолятора», с температуропроводностью  $a = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , которая защищает человека от раздражающей температуры среды (стенки, трубопровода) с температурой  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , в течение времени  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ .

Толщина «изолятора», которая защитит человека от раздражающей температуры среды (стенки, трубопровода)  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , до начала наступления температурного ощущения человека, т.е. при  $R_{\text{ТЕРМ}} = 7,85 \text{ дБ}$ , в течение времени  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ :

$$\delta = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot k_T) = 7,85/(4,34 \cdot 396) = 0,00457 \text{ м} = 4,6 \text{ мм.}$$

Толщина «изолятора», которая защитит человека от раздражающей температуры среды (стенки, трубопровода)  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , до ощущения болевого порога человека, т.е. при  $R_{\text{ТЕРМ}} = 5,63 \text{ дБ}$ , в течение времени  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ :

$$\delta = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot k_T) = 5,63/(4,34 \cdot 396) = 0,00328 \text{ м} = 3,3 \text{ мм.}$$

Толщина «изолятора», которая защитит человека от раздражающей температуры среды (стенки, трубопровода)  $t_c = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ , от начала наступления температурного ощущения человека, до болевого порог человека, т.е. при  $R_{\text{ТЕРМ}} = 2,22 \text{ дБ}$ , в течение времени  $\tau_3 = 100 \text{ с}$ :

$$\delta = R_{\text{ТЕРМ}}/(4,34 \cdot k_T) = 2,22/(4,34 \cdot 396) = 0,00129 \text{ м} = 1,3 \text{ мм.}$$

Эту же толщину «изолятора», при  $R_{\text{ТЕРМ}} = 2,22 \text{ дБ}$ , и следовательно при  $H = 0,51$ , можно определить и по формуле (101):

$$\delta = H/k_T = 0,51/396 = 0,00129 \text{ м} = 1,3 \text{ мм.}$$

Расчеты совпадают, т.е.:  $1,3 \text{ мм} = 1,3 \text{ мм}$ , кроме того по толщинам материала тоже имеется совпадение, т.е.  $4,6 \text{ мм} = 3,3 \text{ мм} + 1,3 \text{ мм}$ . Это подтверждает правильность проведенных расчетов по толщине «изолятора».

Следовательно, проведенные расчеты (примеры) по определению эргономических характеристик и температурного ощущения человека при различных сочетаниях времени, толщины «изолятора» и температуропроводности материала, полностью подтверждают закон температурного ощущения.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1. Установлен уровень звукового ощущения  $E_A$ , который представляет собой уровень над минимальным порогом слышимости  $E_{\text{ПС}} = 0$ , то есть определяет относительный уровень звукового ощущения.

2. Установлен порог температурного комфортного ощущения человека  $t_k = 30$  °С, минимальный порог температурного ощущения  $+ 10$  °С, что соответствует переходному климатологическому режиму (зимний — летний) и максимальный порог температурного ощущения  $+ 50$  °С.

3. Впервые сформулирован закон температурного ощущения (автор Фокин В. М. и Тинякова И. Г.): температурное ощущение человека пропорционально логарифму раздражающей температуры.

4. Установлено, что любой уровень температурного ощущения  $E_T$  (дБ) представляет собой уровень (по абсолютному значению) над минимальным порогом комфортного температурного ощущения  $E_{ТК} = 0$  дБ, т.е. определяет относительный уровень температурного ощущения.

5. Впервые сформулированы правила критического уровня температурного ощущения:

а) термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (в децибелах) будет считаться рентабельной для комфортного ощущения человека, при значении  $R_{\text{ТЕРМ}}$  большем относительного уровня температурного ощущения 2,22 дБ, то есть:

$$R_{\text{ТЕРМ}} > 2,22 \text{ дБ};$$

б) термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  для комфортного температурного ощущения будет эффективнее (выше) при большей толщине  $\delta$  (м) материала (вещества) и меньшем значении теплопроводности  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

6. Правила критического уровня температурного ощущения позволяют установить, что с точки зрения термоизоляции, относительный уровень начала температурного ощущения, имеет вид:  $E_T = (R_{\text{ТЕРМ}} - 2,22)$ , дБ.

7. Правила критического уровня температурного ощущения позволяют абсолютно точно установить, что пока существует материал («изолятор») определенной толщины  $\delta$ , теплопроводностью  $a$ , термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  которого более  $E_T = 2,22$  дБ, то есть при условии:  $R_{\text{ТЕРМ}} > 2,22$  дБ, человек защищен от избыточной температуры  $\vartheta_k$  и пребывает в комфортных температурных условиях.

8. Впервые установлено, что при относительном уровне температурного ощущения  $E_T = 2,22$  дБ, безразмерный волновой комплекс  $H = k\delta = 0,51$ .

9. Математический эксперимент по тепловозвучковой аналогии позволяет для твердого материала («изолятора») определять следующие параметры:

— эргономическое время  $\tau_3$  наступления относительного уровня температурного ощущения: для уровня температурного комфортного ощущения и для уровня болевого порога температурного ощущения человека;

— толщину  $\delta$  (м) «изолятора», для обеспечения комфортного температурного ощущения и более нулевого уровня.

10. Приведены алгоритмы по определению температурного ощущения:

а) если известна термоизоляция материала  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ), толщина «изолятора»  $\delta$  (м), температуропроводность  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), то вычисляется соответствующее эргономическое время  $\tau_{\text{Э}}$  (с), определяющее уровень температурного ощущения человека;

б) если известна термоизоляция материала  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ), температуропроводность «изолятора»  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), время в течение которого требуется обеспечить комфортное температурное ощущение  $\tau_{\text{Э}}$  (с), то вычисляется соответствующая толщина «изолятора»  $\delta$  (м), обеспечивающая это комфортное температурное ощущение человека.

11. Впервые установлен комплекс  $H = kx = k\delta = 0,51$ , который определяет относительный уровень температурного ощущения  $E_{\text{T}} = 2,22$  дБ;

12. Впервые получены соотношения, которые позволяют определять волновое число  $k_{\text{T}}$ , термоизоляцию «изолятора», или толщину  $\delta$  «изолятора», при любом относительном уровне температурного ощущения  $E_{\text{T}}$  (дБ) или термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ).

13. Впервые получены соотношения, которые позволяют определять теплопроводность «изолятора»  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  (102 г), (102 д).

14. Согласно закона температурного ощущения, относительный уровень температурного ощущения  $E_{\text{T}}$  определяется для любой раздражающей температуры среды  $t_{\text{С}}$  или амплитуды колебания раздражающего температурного ощущения  $\vartheta_{\text{К}}$ , что позволяет абсолютно точно установить:

а) эргономическое время до начала наступления температурного ощущения человека  $\tau_{\text{Э}}$ ;

б) эргономическое время до болевого порога человека  $\tau_{\text{Э}}$ ;

в) эргономическое время от начала наступления температурного ощущения до болевого порога  $\tau_{\text{Э}}$ .

15. Выполненные примеры по определению температурного ощущения человека полностью подтверждают математический эксперимент по тепловозвучковой аналогии, эргономическим характеристикам, уровню звукового и температурного ощущения, а также закон температурного ощущения.

## ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО-ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН

### 5.1 Устройство и работа измерителя тепло-звукофизических свойств материалов (FOKUS) на образце в виде пластины

Сущность разработанного способа экспериментального определения комплекса тепло-звукофизических свойств (ТЗФС) твердых строительных материалов и изделий, на образцах в виде пластины, методом температурных волн и неразрушающего контроля, а также устройство FOKUS для его осуществления, состоят в следующем. Исследуемый образец в форме призмы квадратного сечения (пластины) с размерами  $250 \times 250 \times (5 \dots 50)$  мм помещают в устройство, схема которого приведена на рис. 5.1.

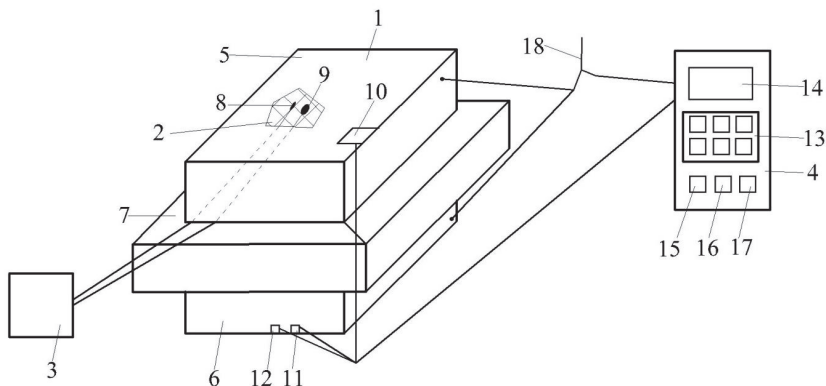


Рис. 5.1 Устройство FOKUS для экспериментального определения тепло-звукофизических свойств твердых строительных материалов на образце в виде пластины методом тепло-звуковой аналогии

- 1 — установка; 2 — исследуемый образец; 3 — ЭВМ; 4 — электронный блок управления; 5 — плоский нагреватель; 6 — холодильник;
- 7 — герметичные крышки (теплоизолятор); 8 — датчик температуры;
- 9 — датчик теплового потока на образце со стороны нагревателя;
- 10 — термопара нагревателя; 11 — термопара холодильника;
- 12 — датчик теплового потока со стороны холодильника;
- 13 — пульт управления на кнопках; 14 — дисплей; 15 — блок памяти;
- 16 — таймер; 17 — вычислительное устройство; 18 — электрическая сеть



Способ определения комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и устройство для его осуществления подтверждены патентом на изобретение: РФ № 2788562 и патентом РФ № 2767468.

Конструкция устройств FOKUS состоит из установки 1 для испытания исследуемого образца-материала 2, ЭВМ 3 и электронного блока управления 4, предназначенных для снятия и регистрации показаний, а также расчёта:

а) теплофизических характеристик: плотности теплового потока, амплитуды колебаний температурной полуволны, волнового температурного числа, теплопроводности и термического сопротивления, теплоёмкости и температуропроводности, тепловой инерции и тепловой активности, термопроводности и термоизоляции;

б) тепло-звукофизических характеристик: поверхностной скорости температурной волны, плотности тепловой энергии, термического напряжения на поверхности, безразмерного числа волновой скорости, звуковой (акустической) скорости, волнового числа акустической волны, длины свободного пробега фононов, звукоизоляции и звукопроводности.

Установка 1 для испытания исследуемого образца в виде пластины содержит плоский нагреватель 5, для нагрева сверху исследуемого образца 2, холодильник 6, для охлаждения снизу исследуемого образца 2, который размещён между нагревателем 5 и холодильником 6. При этом торцы исследуемого образца 2 со всех сторон закрыты герметичными крышками 7, предназначенными для теплоизоляции и стабилизации температуры и теплового потока. Помимо этого, на середине грани исследуемого образца 2 со стороны нагревателя 5 установлены датчик измерения температуры 8, предназначенный для измерения температуры исследуемого образца 2 со стороны нагревателя 5 и датчик теплового потока 9, для измерения плотности теплового потока со стороны нагревателя 5, подключенные к прибору ЭВМ 3.

Помимо этого, к электронному блоку управления 4 подключены термопара 10, установленная на нагревателе 5, для фиксации температуры нагревателя 5, термопара 11, установленная на холодильнике 6, для измерения температуры холодильника, а также датчик теплового потока 12, установленный на холодильнике 6, для измерения стационарной плотности теплового потока. Электронный блок управления 4 содержит пульт управления с кнопками 13 для включения и выключения установки 1, регулирования заданной температуры нагревателя 5, холодильника 6 и толщины исследуемого образца 2, дисплей 14 для отображения информации, блок памяти 15, таймер 16 и вычислительное устройство 17. Прибор ЭВМ 3, нагреватель 5, холодильник 6, электронный блок управления 4 подключены к источнику переменного тока 18.

### *Работа устройства.*

Устройство работает следующим образом. На середину плоскости поверхности исследуемого образца 2 со стороны нагревателя 5 устанавливается датчик измерения температуры 8 и датчик теплового потока 9. Исследуемый образец 2 помещают между нагревателем 5 и холодильником 6, торцы закрываются герметичными крышками 7.

В электронном блоке управления 4 с помощью пульта управления 13 устанавливают температуру нагревателя 5, температуру холодильника 6, толщину образца 2 и включают установку 1. Нагреватель 5 начинает нагреваться до заданной температуры, а холодильник 6 охлаждаться до заданной температуры. Электронный блок управления 4 поддерживает заданные температуры нагревателя 5 и холодильника 6 и контролирует их с точностью  $\pm 0,1$  °С, до тех пор, пока тепловой поток, проходящий через испытываемый образец 2, не стабилизируется. Температуры нагревателя 5, холодильника 6, стационарная плотность теплового потока заносятся в блок памяти 15 электронного блока управления 4. Температуры поверхности исследуемого образца 2 со стороны нагревателя 5 и плотности теплового потока со стороны нагревателя 5 заносятся в прибор ЭВМ 3. Запись показаний производится до наступления стационарного теплового режима. Вычислительное устройство 17 блока управления 4, используя значения температуры нагревателя и холодильника, стационарную плотность теплового потока по известным формулам рассчитывает коэффициент теплопроводности и коэффициент термического сопротивления. Посредством прибора ЭВМ 3 по полученным экспериментальным данным определяют комплекс теплофизических характеристик твёрдых строительных материалов. По окончании времени эксперимента установка 1 выключалась.

В начале процесса с помощью пульта управления кнопками 6 устанавливают определенно фиксированную температуру нагревателя 5, в интервале 20...65 °С, температуру холодильника 6, в интервале 5...15 °С, толщину образца — пластины в интервале 5...50 мм, а затем включается устройство и таймер времени 16.

В дальнейшем наблюдение за тепловым потоком и температурами осуществляется автоматически, таймер в электронном блоке управления отсчитывает время наблюдения, в течение которого производится запись показаний в блок памяти и автоматическое вычисление значений ТФС. Запись всех показаний производится до момента наступления стационарного теплового режима. По окончании времени отсчитанного таймером устройство выключается.

В течение эксперимента, вычислительное устройство 17, используя полученные параметры от датчиков, с помощью ЭВМ 3, фиксирует плотность

теплового потока в стационарном тепловом режиме, а также максимальную плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагревателя, температуры и температурную волну на поверхности исследуемого материала со стороны нагрева. Вычислительное устройство, с помощью ЭВМ, также рассчитывает ТФС исследуемого материала.

Общий вид распределения температур на поверхности образца со стороны нагревателя  $T_{П1}$  и холодильника  $T_{П2}$ , а также плотности теплового потока  $q_{П}$  со стороны нагрева, в установке FOKUS, приведён на рис. 5.2.

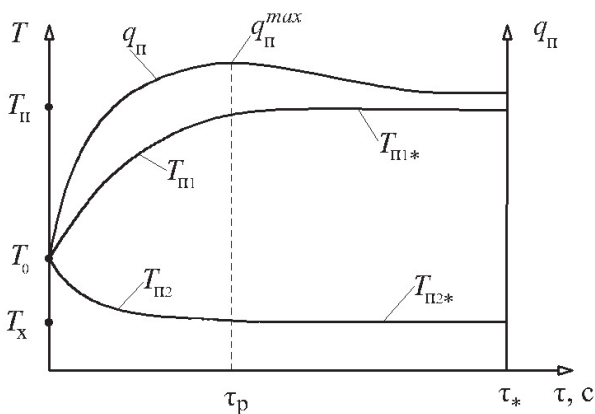


Рис. 5.2 Распределение температур и теплового потока на поверхностях образца — пластины

- $T_0$  — начальная температура образца;  $T_H$  — температура нагревателя;
- $T_X$  — температура холодильника;  $T_{П1}$  — температура образца со стороны нагревателя;  $T_{П2}$  — температура образца со стороны холодильника;
- $T_{П1*}$  — температура образца со стороны нагревателя в стационарном режиме;
- $T_{П2*}$  — температура образца со стороны холодильника в стационарном режиме;  $q_{П}$  — тепловой поток;
- $q_{П}^{max}$  — максимальный тепловой поток на поверхности;
- $q_{П}^*$  — тепловой поток в стационарном тепловом режиме;
- $\tau_p$  — время достижения максимальной плотности теплового потока;
- $\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима

После включения устройства, температура образца — пластины со стороны холодильника  $T_{П2}$ , начинает незначительно изменяться, достигает заданного значения температуры холодильника  $T_X$  и становится постоянной  $T_{П2*} = T_X$ . Температура образца со стороны нагревателя  $T_{П1}$  начинает расти, достигает

своего заданного значения и становится равной температуре нагревателя  $T_{\text{П}^*} = T_{\text{Н}}$ , то есть, наступает стационарный тепловой режим. Начальная температура поверхности образца со стороны нагревателя  $T_0$  измерялась до начала эксперимента.

В процессе эксперимента, тепловой поток начинает возрастать от своего начального, до максимального значения  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$ . Во время фиксирования максимального значения плотности теплового потока  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$  на поверхности, выявляется температура на поверхности образца со стороны нагревателя  $T_{\text{П}}$  и время  $\tau_{\text{р}}$  наступления упорядоченного теплового режима и максимального значения плотности теплового потока  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$ . Далее тепловой поток снижается, стабилизируется и становится постоянным во времени, то есть, наступает стационарный тепловой режим.

Вначале проведения эксперимента фиксируются экспериментальные значения соответствующих температур пластины и плотности теплового потока в стационарном тепловом режиме, максимальная плотность теплового потока и температура поверхности исследуемого образца со стороны нагревателя при максимальном значении плотности теплового потока и их время. Затем производится расчёт комплекса тепло-звукофизических характеристик: теплопроводности, теплоусвоения, теплоемкости, температуропроводности, тепловой инерции, термического сопротивления и др.

Авторами были проведены серии экспериментальных исследований тепло-звукофизических свойств различных строительных, теплоизоляционных материалов (оргстекло, фторопласт, текстолит и др.) методом неразрушающего контроля, проводившиеся с помощью устройства FOKUS, а расчеты ТЗФС материалов проводились по полученным экспериментальным результатам для двух режимов измерений:

- в стационарном тепловом режиме, при  $q_{\text{П}}^*$ ;
- в упорядоченном тепловом режиме, при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева:  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$ .

Предлагаемый способ неразрушающего контроля комплекса тепло-звукофизических свойств твердых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов, выгодно отличается от известных методов: количеством параметров ТЗФС, энергоэффективностью, быстродействием, малой погрешностью, обладает новизной и оригинальностью.

Кроме того, предлагаемый способ позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому является перспективными для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТЗФС ма-

териалов и технической теплофизике. Все графические построения и математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel и других аналогичных программах ЭВМ.

## 5.2 Методика VA экспериментального определения ТЗФС материалов на образце — пластине в установке FOKUS

Методика VA экспериментального определения ТЗФС твердых строительных материалов и изделий на образцах — пластинах сводится к последовательному выполнению следующих операций или действий: вначале предварительной подготовке и сбора информации, а затем по результатам эксперимента расчет параметров ТЗФС исследуемого материала.

1. Используется готовое изделие или изготавливается образец — пластина размером  $250 \times 250 \times 5 \dots 50$  мм. Изделие (пластина) взвешивается на весах и замеряется его масса  $m$  (кг), измеряется толщина пластины  $\delta$  (м), а линейные размеры соответственно равны:  $0,25 \times 0,25 \times \delta$  м.

По линейным размерам и толщине пластины (образца) вычисляется: объем изделия  $V$  ( $\text{м}^3$ ), удельная плотность материала  $\rho = m/V$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), а также поверхностная плотность пластины, которая согласно (67):  $\rho_{\text{П}} = \rho \cdot \delta$ , ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ).

2. Образец — пластина устанавливается в устройство FOKUS и фиксируется с торцов теплоизолятором для снижения потерь теплоты.

3. В электронный блок 4 устройства, кнопками пульта управления 6, вводятся и устанавливаются необходимые для эксперимента параметры: температура нагревателя  $T_{\text{Н}}$  и холодильника  $T_{\text{Х}}$ , а также толщина пластины  $\delta$ .

4. Включается устройство и проводится запись соответствующих параметров. Устройство выключается автоматически при достижении наступления стационарного теплового режима в пластине.

5. В процессе и после завершения эксперимента, полученные параметры для образца — пластины фиксируются на дисплее прибора, а именно:

$\delta$  — толщина пластины, м;

$T_0$  — начальная температура образца — пластины, °С;

$T_{\text{Н}}$  — температура нагревателя, °С;

$T_{\text{Х}}$  — температура холодильника, °С;

$T_{\text{П1}}$  — температура на поверхности пластины со стороны нагрева, °С;

$q_{\text{П}}^{\text{max}}$  — максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагревателя, в момент наступления упорядоченного теплового режима,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$t_{\text{р}}$  — время, при котором достигается максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины, с;

$q_{\Pi}^*$  — плотность теплового потока в пластине, в момент наступления стационарного теплового режима, Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима, с.

Следует отметить, что расчеты соответствующих показателей ТЗФС материалов, можно проводить в двух режимах: в стационарном тепловом режиме и при максимальном значении плотности теплового потока на поверхности пластины. В процессе проведения эксперимента и после его завершения, последовательно вычисляются вначале теплофизические свойства материала пластины, а затем и тепло-звукофизические свойства.

*Стационарный тепловой режим: при  $q_{\Pi}^*$*

В момент наступления стационарного теплового режима в пластине, то есть при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ , определяются следующие параметры.

1. Температурный напор, перепад или разность температур на внешней и внутренней поверхности пластины:

$$\Delta T_* = (T_H - T_X), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. Теплопроводность, согласно (6):

$$\lambda = (q_{\Pi}^* \cdot \delta) / \Delta T_* = (q_{\Pi}^* \cdot \delta) / (T_H - T_X), \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

3. Термическое сопротивление теплопроводности, согласно (56):

$$R_{\Pi\lambda} = \delta / \lambda = \Delta T_* / q_{\Pi}^*, \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}.$$

4. Амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{\Pi}^*$ :

$$\vartheta_{\Pi}^* = 0,5 (T_H - T_X) = 0,5 \Delta T_*, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

5. Коэффициент теплоусвоения  $B_*$ , согласно (47 а) или (56 б):

$$B_* = q_{\Pi}^* / \vartheta_{\Pi}^*, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \text{ или:}$$

$$B_* = 2 / R_{\Pi\lambda}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

6. Волновое температурное число, согласно (52) или (55):

$$k_T^{\text{пл}} = 1,414 / \delta, \text{ м}^{-1}, \text{ или:}$$

$$k_T^{\text{пл}} = 0,707 (B_* / \lambda), \text{ м}^{-1}.$$

7. Теплопроводность также возможно вычислять по одной из формул (55) или (56 в):

$$\lambda = B_*/1,414 k_T^{пл} = 0,707 (B_*/k_T^{пл}), \text{ или:}$$

$$\lambda = 0,5 (B_* \cdot \delta), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость, согласно (55 в):

$$(c\rho) = (B_*)^2 \cdot (\tau_*) / (\pi \cdot \lambda), \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

9. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho) / \rho, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

10. Температуропроводность, согласно (52 а):

$$a = \pi / [2\tau_* (k_T^{пл})^2], \text{ м}^2/\text{с},$$

11. Температуропроводность может определяться также согласно (53):

$$a = 0,785 (\delta^2 / \tau_*) \approx 0,8 (\delta^2 / \tau_*), \text{ м}^2/\text{с}.$$

Число Фурье, согласно (54), должно численно равняться  $0,785 \approx 0,8$ :

$$Fo = (a \cdot \tau_*) / \delta^2 = 0,8.$$

12. Волновое температурное число может определяться и согласно (20):

$$k_T^{пл} = \sqrt{\pi / (2a \cdot \tau_*)}, \text{ м}^{-1}.$$

13. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$  связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$\lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$a = \lambda / (c\rho), \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

14. Тепловая инерция, согласно (89) или (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c\rho), \text{ или:}$$

$$b = \lambda^2 / a, \text{ Дж}^2 / (\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

15. Тепловая активность, согласно (90), (90 а) или (90 б):

$$b_* = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)} = \lambda \cdot \sqrt{a} = \sqrt{b}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К)}.$$

16. Термоизоляция, согласно (43):

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{пл} \cdot \delta), \text{ дБ}.$$

17. Теплопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}}.$$

*Максимальная плотность теплового потока на поверхности: при  $q_{\text{II}}^{\text{max}}$*

В момент наступления упорядоченного теплового режима ( $\tau_p$ ) и достижения максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины ( $q_{\text{II}}^{\text{max}}$ ) со стороны нагревателя, определяются следующие параметры.

18. Максимальная амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{\text{II}}^{\text{max}}$ :

$$\vartheta_{\text{II}}^{\text{max}} = 0,5 (T_{\text{II1}} - T_0), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

19. Коэффициент теплоусвоения  $B_p$ , согласно (47):

$$B_p = q_{\text{II}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{II}}^{\text{max}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

20. Волновое температурное число, согласно (54):

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = B_p / (1,414 \cdot \lambda) = 0,707 (B_p / \lambda), \text{ м}^{-1}.$$

21. Объемная теплоемкость, согласно (50 а):

$$(c\rho) = (B_p)^2 \cdot (\tau_p) / (2\pi \cdot \lambda), \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

22. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho) / \rho, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

23. Температуропроводность, согласно (50 б):

$$a = \pi / [\tau_p (k_{\text{T}}^{\text{пл}})^2], \text{ м}^2/\text{с}.$$

24. Температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), также связаны соотношениями (7) и (9):

$$a = \lambda / (c\rho), \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

25. Тепловая инерция, согласно (89) или (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c\rho), \text{ или: } b = \lambda^2 / a, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

26. Тепловая активность, согласно (90), (90 а) или (90 б):

$$b_* = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)} = \lambda \cdot \sqrt{a} = \sqrt{b}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$



27. Термоизоляция, согласно (43)

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_{\text{T}}^{\text{пл}} \cdot \delta), \text{ дБ.}$$

28. Теплопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}},$$

29. Расчеты основных теплофизических свойств материала, полученных экспериментально при двух тепловых режимах измерений (при  $\tau_*$  и  $\tau_{\text{р}}$ ), сводятся в таблицу 5.1.

Т а б л и ц а 5.1 Основные теплофизические свойства материала

Параметр	Режим при $\tau_*$ и $q_{\text{п}}^*$	Режим при $\tau_{\text{р}}$ и $q_{\text{п}}^{\text{max}}$	Табличные значения
1. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)			
2. Волновое число $k_{\text{T}}^{\text{пл}}$ , м <sup>-1</sup>			
3. Объемная теплоемкость ( $c_{\text{р}}$ ), кДж/(м <sup>3</sup> ·К)			
4. Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с			
5. Тепловая активность $b_*$ , кДж/(с <sup>0,5</sup> ·м <sup>2</sup> ·К)			
6. Термоизоляция $R_{\text{ТЕРМ}}$ , дБ			
7. Теплопроводность $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$			

*Расчет ТЗФС материала.*

Тепло-звукофизические свойства (ТЗФС) материалов, вычисляются для стадии стационарного теплового режима (при  $\tau_*$  и  $q_{\text{п}}^*$ ), когда теплоусвоение  $B$  материала стабилизируется.

30. Поверхностная скорость температурной волны, согласно (73):

$$S_{\text{п}} = a/\delta, \text{ м/с.}$$

31. Плотность тепловой энергии пластины  $\mathcal{E}_{\text{T}}$ , согласно (81):

$$\mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}} = q_{\text{п}}^*/S_{\text{п}}, \text{ Дж/м}^3.$$

32. Объемная теплоемкость ( $c_{\text{р}}$ ), также согласно (78 а):

$$(c_{\text{р}}) = \mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}}/\Delta T_*, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К).}$$

33. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (77):

$$c = \lambda / (S_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}), \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

34. Поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , согласно (82), также связана соотношением:

$$S_{\Pi} = q_{\Pi}^* / \varepsilon_T^{\text{пл}}, \text{ м/с}.$$

35. Термическое напряжение на поверхности  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}$ , согласно (60), численно пропорционально коэффициенту теплоусвоения  $B$ , при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = B_*, (\text{Па} \cdot \text{м}).$$

36. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}$ , согласно (63), обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\text{пл}}$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = 2/R_{\text{пл}} = 1/0,5R_{\text{пл}}, (\text{Па} \cdot \text{м}).$$

37. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K$ , согласно (85):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \psi_{\Pi}^{\text{пл}}).$$

38. Звуковая (акустическая) скорость, согласно (86):

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_K, \text{ м/с},$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м}$ .

39. Длина свободного пробега фононов, согласно (88):

$$L_{\Phi} = 3a/C_A, \text{ м}.$$

40. Модуль упругости Юнга, согласно (88):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho, (\text{Па}).$$

41. Частота звука  $f_*$  ( $\text{с}^{-1}$ ), с которой проникает акустическая (звуковая) волна на заданную глубину или толщину  $\delta$  (м), согласно (33):

$$f_* = (H_A \cdot C_A) / (2\pi \cdot \delta), (\text{с}^{-1}).$$

То есть, звуковая (акустическая) волна с частотой меньше  $f_*$  (Гц), будет проникать или проходить через пластину толщиной  $\delta$  (м), а с частотой более  $f_*$  — будет поглощаться материалом пластины (вещества).

Безразмерный волновой комплекс  $H_A = 1,414$  и соответствует доле про-  
никновения гармонических колебаний  $\theta = 0,243$ .

42. Частота колебаний звуковой (акустической) волны, согласно (15):

$$\omega_A = 2\pi f, (\text{с}^{-1}).$$

43. Волновое число акустической волны, определяется согласно (19):

$$k_A = \omega_A / C_A, \text{ м}^{-1}.$$

44. Звукопроводность пластины при определенной частоте  $f$ , толщине  
пластины  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37):

$$\alpha_{\text{ПР}} = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}.$$

45. Звукоизоляция пластины в децибелах, согласно (38):

$$R_W = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ПР}}), \text{ дБ}.$$

46. Для наглядности звукофизических свойств материала пластины и для  
произвольной частоты звука:  $f = 1000$  Гц,  $f = 5000$  Гц,  $f = 10000$  Гц,  $f^*$ ,  
рассчитываются следующие параметры:

- частота колебаний звуковой  $\omega_A$  (акустической) волны, согласно (15);
- волновое число  $k_A$ , для звуковой волны, согласно (19);
- звукопроводность пластины  $\alpha_{\text{ПР}}$  при определенной частоте  $f$ , тол-  
щине  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37);
- звукоизоляция пластины  $R_W$  в децибелах, согласно (38).

Расчеты основных звукофизических свойств материала пластины сво-  
дятся в таблицу 5.2.

Т а б л и ц а 5.2 Основные звукофизические свойства пластины:

- частота колебаний звуковой волны  $\omega_A$ ;
- волновое число звуковой волны  $k_A$ ;
- звукопроводность  $\alpha_{\text{ПР}}$ ; звукоизоляция  $R_W$ ;
- для частоты звука:  $f = 1000$  Гц,  $f = 5000$  Гц;  $f = 10000$  Гц,  $f^*$ .

Параметр	Частота звука $f$ , Гц			
	$f = 1000$	$f = 5000$	$f = 10000$	$f^*$
Частота колебаний $\omega_A$ звуковой волны: $\omega_A = 2\pi f, (\text{с}^{-1})$				
Волновое число $k_A$ , для звуко- вой волны: $k_A = \omega_A / C_A, \text{ м}^{-1}$				
Звукопроводность: $\alpha_{\text{ПР}} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}$				
Звукоизоляция: $R_W = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ПР}}), \text{ дБ}$				

## 5.3 Физический эксперимент тепло-звуковой аналогии

### 5.3.1 Теплофизический эксперимент пластины из текстолита

Физический эксперимент проводится согласно методики 5.2.

1. Использовалась пластина из текстолита размером  $250 \times 250$  мм.

Толщина пластины:  $\delta = 20$  мм ( $0,02$  м). Масса пластины  $m = 1,68$  (кг).

Объем пластины  $V = 0,25 \times 0,25 \times 0,02 = 0,00125$  м<sup>3</sup>.

Удельная плотность пластины:  $\rho = m/V = 1,68/0,00125 = 1340$  (кг/м<sup>3</sup>).

Поверхностная плотность:  $\rho_{\Pi} = \rho \cdot \delta = 1340 \cdot 0,02 = 26,8$  (кг/м<sup>2</sup>).

2. В процессе и после завершения эксперимента, полученные параметры для пластины из текстолита фиксируются на дисплее прибора, а именно:

$\delta$  — толщина пластины:  $\delta = 0,02$  м;

$T_0$  — начальная температура пластины:  $T_0 = 22$  °С;

$T_H$  — температура нагревателя:  $T_H = 34$  °С;

$T_X$  — температура холодильника:  $T_X = 19$  °С;

$T_{\Pi 1}$  — температура на поверхности пластины со стороны нагревателя, при максимальном значении плотности теплового потока:  $T_{\Pi 1} = 34$  °С;

$q_{\Pi}^{max}$  — максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева, в момент наступления упорядоченного теплового режима:  $q_{\Pi}^{max} = 282$  Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_p$  — время, при котором достигается максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины:  $\tau_p = 22$  мин = 1320 с.

$q_{\Pi}^*$  — плотность теплового потока в пластине, в момент наступления стационарного теплового режима:  $q_{\Pi}^* = 195$  Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_*$  — время начала стационарного теплового режима: 36 мин = 2160 с.

На рис. 5.3 приведено экспериментальное распределение температур и теплового потока на поверхности образца — пластины из текстолита. На рис. 5.4 приведено фото экспериментальной установки ФОКУС.

Расчет ТФС текстолита.

*Стационарный тепловой режим* —  $q_{\Pi}^*$

В момент наступления стационарного теплового режима в пластине, то есть при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ , определяются следующие параметры.

1. Температурный напор, перепад или разность температур на внешней и внутренней поверхности пластины:

$$\Delta T_* = (T_H - T_X) = (34 - 19) = 15 \text{ °С.}$$

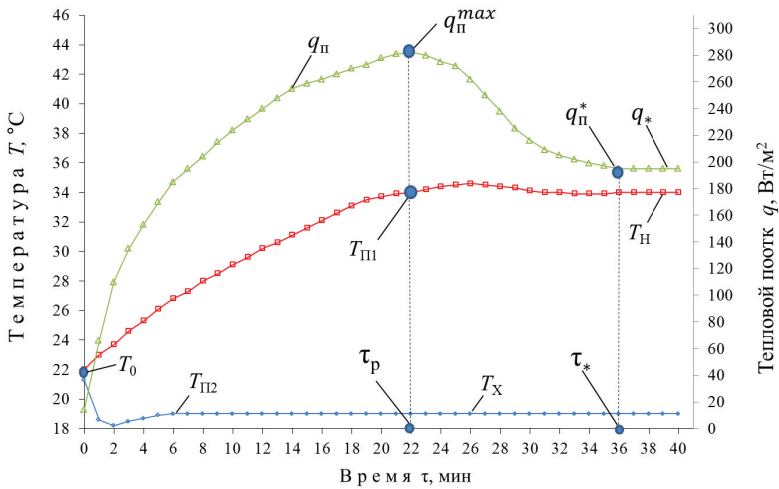


Рис. 5.3. Экспериментальное распределение температур и теплового потока в образце из текстолита:

- $T_{II}$  — экспериментальное распределение температур со стороны нагревателя, °C;
- $T_X$  — экспериментальное распределение температур со стороны холодильника, °C;
- $T_{II1}$  — температура со стороны нагрева при  $q_{II}^{max}$ , °C;
- $T_{II2}$  — температура со стороны холодильника, °C;  $T_0$  — начальная температура, °C;
- $q_{II}$  — плотность теплового потока со стороны нагревателя, Вт/м<sup>2</sup>;
- $q_{II}^{max}$  — максимальное значение плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;
- $q_*$  — плотность стационарного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;
- $\tau_p$  — время достижения максимальной плотности теплового потока  $q_{II}^{max}$ ;
- $\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима.



Рис. 5.4 Фото экспериментальной установки ФОКУС

2. Теплопроводность, согласно (6):

$$\lambda = (q_{\text{II}}^* \cdot \delta) / \Delta T_* = (195 \cdot 0,02) / 15 = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

3. Термическое сопротивление теплопроводности, согласно (56):

$$R_{\text{III}} = \delta / \lambda = 0,02 / 0,26 = 0,077 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)} / \text{Вт}.$$

4. Амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{\text{II}}^*$ :

$$\vartheta_{\text{II}}^* = 0,5 \Delta T_* = 0,5 \cdot 15 = 7,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5. Коэффициент теплоусвоения  $B_*$ , согласно (47 а) или (56 б):

$$B_* = q_{\text{II}}^* / \vartheta_{\text{II}}^* = 195 / 7,5 = 26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \text{ или:}$$

$$B_* = 2 / R_{\text{III}} = 2 / 0,077 = 26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Волновое температурное число в пластине, согласно (52) или (55):

$$k_{\text{T}}^{\text{ПЛ}} = 1,414 / \delta = 1,414 / 0,02 = 70,7 \text{ м}^{-1}, \text{ или:}$$

$$k_{\text{T}}^{\text{ПЛ}} = 0,707 (B_* / \lambda) = 0,707 (26 / 0,26) = 70,7 \text{ м}^{-1}.$$

7. Теплопроводность, согласно (56 в):

$$\lambda = 0,5 (B_* \cdot \delta) = 0,5 (26 \cdot 0,02) = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

8. Объемная теплоемкость, согласно (55 в):

$$(c\rho) = (B_*)^2 \cdot (\tau_*) / (\pi \cdot \lambda) = (26)^2 \cdot (2160) / (3,14 \cdot 0,26) = 1,79 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

9. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho) / \rho = 1,79 \cdot 10^6 / 1340 = 1336 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

10. Температуропроводность, согласно (52 а):

$$a = \pi / [2\tau_* (k_{\text{T}}^{\text{ПЛ}})^2] = 3,14 / [2 \cdot 2160 \cdot (70,7)^2] = 0,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с},$$

11. Температуропроводность может определяться также согласно (53):

$$a = 0,785 (\delta^2 / \tau_*) = 0,785 (0,0004 / 2160) = 0,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Число Фурье, согласно (54), должно численно равняться  $0,785 \approx 0,8$ :

$$Fo = (a \cdot \tau_*) / \delta^2 = 0,145 \cdot 10^{-6} (2160 / 0,0004) = 0,785 \approx 0,8.$$

12. Волновое температурное число может определяться и согласно (20):

$$k_T^{пл} = \sqrt{\pi/(2a \cdot \tau_*)} = (3,14/2 \cdot 0,145 \cdot 10^{-6} \cdot 2160)^{0,5} = 70,7 \text{ м}^{-1}.$$

13. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $ср$ ) связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$\lambda = a \cdot (ср) = (0,145 \cdot 10^{-6}) \cdot (1,79 \cdot 10^6) = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$a = \lambda/(ср) = 0,26/1,79 \cdot 10^6 = 0,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(ср) = \lambda/a = 0,26/0,145 \cdot 10^{-6} = 1,79 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

14. Тепловая инерция, согласно (89 а):

$$b = \lambda \cdot (ср) = 0,26 (1,8 \cdot 10^6) = 0,468 \cdot 10^6 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

15. Тепловая активность, согласно (90 б):

$$b_* = \sqrt{b} = (0,468 \cdot 10^6)^{0,5} = 0,684 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}) = 0,68 \text{ кДж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

16. Термоизоляция, согласно (43):

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{пл} \cdot \delta) = 4,34 (70,7 \cdot 0,02) = 6,14 \text{ дБ}.$$

17. Термопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}} = 10^{-0,1 \cdot 6,14} = 1/10^{0,614} = 1/4,11 = 0,24.$$

*Максимальная плотность теплового потока —  $q_{\Pi}^{max}$ .*

В момент наступления упорядоченного теплового режима ( $\tau_p$ ) и достижения максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины ( $q_{\Pi}^{max}$ ) со стороны нагревателя, определяются следующие параметры.

18. Максимальная амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{\Pi}^{max}$ :

$$\vartheta_{\Pi}^{max} = 0,5 (T_{\Pi 1} - T_0) = 0,5 (34 - 22) = 6,0 \text{ }^{\circ}\text{С}.$$

19. Коэффициент теплоусвоения  $B_p$ , согласно (47):

$$B_p = q_{\Pi}^{max} / \vartheta_{\Pi}^{max} = 282/6 = 47 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

20. Волновое температурное число в пластине, согласно (54):

$$k_T^{пл} = B_p / (1,414 \cdot \lambda) = 0,707 (B_p / \lambda) = 0,707 (47/0,26) = 128 \text{ м}^{-1}.$$

21. Объемная теплоемкость, согласно (50 а):

$$(ср) = (B_p)^2 \cdot (\tau_p) / (2\pi \cdot \lambda) = (47)^2 \cdot (1320) / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,26) = 1,8 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

22. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho)/\rho = 1,8 \cdot 10^6 / 1340 = 1343 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

23. Температуропроводность, согласно (50 б):

$$a = \pi / [\tau_{\text{P}} (k_{\text{T}}^{\text{пл}})^2] = 3,14 / 1320 \cdot (128)^2 = 0,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

24. Температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$ , также связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,26 / 1,8 \cdot 10^6 = 0,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a = 0,26 / 0,145 \cdot 10^{-6} = 1,785 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

25. Тепловая инерция, согласно (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,26 (1,785 \cdot 10^6) = 0,464 \cdot 10^6 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

26. Тепловая активность, согласно (90 б):

$$b_* = \sqrt{b} = (0,464 \cdot 10^6)^{0,5} = 0,681 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}) = 0,68 \text{ кДж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

27. Термоизоляция, согласно (43)

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_{\text{T}}^{\text{пл}} \cdot \delta) = 4,34 (128 \cdot 0,02) = 11,1 \text{ дБ}.$$

28. Термопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}} = 10^{-0,1 \cdot 11,1} = 1/10^{1,11} = 1/12,88 = 0,078.$$

29. Расчеты основных теплофизических свойств материала пластины из текстолита, полученных экспериментально при двух тепловых режимах измерений, сводятся в таблицу 5.3.

Т а б л и ц а 5.3 Основные теплофизические свойства текстолита

$\rho = 1340 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \delta = 0,02 \text{ м}.$

Параметр	Режим при $q_{\text{п}}^*$	Режим при $q_{\text{п}}^{\text{max}}$	Табличные значения
1. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,26	0,26	0,23...0,28
2. Волновое число $k_{\text{T}}^{\text{пл}}$ , м <sup>-1</sup>	70,7	128	—
3. Объемная теплоемкость $(c\rho)$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	1790	1800	1700...2000
4. Температуропроводность	0,145	0,145	0,13...0,16



Параметр	Режим при $q_{\Pi}^*$	Режим при $q_{\Pi}^{max}$	Табличные значения
$a \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$			
5. Тепловая активность $b_*$ , $\text{кДж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К})$	0,68	0,68	—
6. Термоизоляция $R_{\text{ТЕРМ}}$ , дБ	6,14	11,1	—
7. Теплопроводность $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$	0,24	0,078	—

*Расчет ТЗФС текстолита.*

Тепло-звукофизические свойства (ТЗФС) текстолита, вычисляются для стадии стационарного теплового режима (при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ ), когда теплоусвоение  $B$  материала стабилизируется.

30. Поверхностная скорость температурной волны, согласно (73):

$$S_{\Pi} = a/\delta = 0,145 \cdot 10^{-6} / 0,02 = 7,25 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с.}$$

31. Плотность тепловой энергии пластины  $\mathcal{E}_{\text{T}}$ , согласно (81):

$$\mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}} = q_{\Pi}^* / S_{\Pi} = 195 / 7,25 \cdot 10^{-6} = 26,9 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

32. Объемная теплоемкость ( $c_{\text{p}}$ ), также согласно (78 а):

$$(c_{\text{p}}) = \mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}} / \Delta T_* = 26,9 \cdot 10^6 / 15 = 1,793 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

33. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (77):

$$c = \lambda / (S_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}) = 0,26 / (7,25 \cdot 10^{-6} \cdot 26,8) = 1338 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

34. Поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , согласно (82), также связана соотношением:

$$S_{\Pi} = q_{\Pi}^* / \mathcal{E}_{\text{T}}^{\text{пл}} = 195 / 26,9 \cdot 10^6 = 7,25 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

35. Термическое напряжение на поверхности  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}$ , согласно (60), численно пропорционально коэффициенту теплоусвоения  $B$ , при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = B_* = 26 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

36. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}$ , согласно (63), обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\text{пл}}$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = 2/R_{\text{пл}} = 2/0,077 = 26 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

37. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{к}}$ , согласно (85):

$$\Phi_k = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \psi_{\Pi}^{пл}) = (7,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (26,8/26) = 54,2 \cdot 10^{-12} = 0,0542 \cdot 10^{-9}.$$

38. Звуковая (акустическая) скорость, согласно (86):

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_k = 0,145 \cdot 10^{-6} / 0,0542 \cdot 10^{-9} = 2675 \text{ м/с},$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,145 \cdot 10^{-6}$  м/с.

Согласно табличным данным [3], для текстолита скорость звука составляет  $C_A = 2500$  м/с; по другим источникам  $C_A = 2900$  м/с. То есть расхождение по скорости звука составляет около 10 %.

39. Длина свободного пробега фононов, согласно (88):

$$L_{\Phi} = 3a / C_A = 3(0,145 \cdot 10^{-6}) / 2675 = 1,63 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 1,63 \text{ \AA}.$$

40. Модуль упругости Юнга, согласно (88):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (2675)^2 \cdot 1340 = 9,59 \cdot 10^9 \text{ Па} = 9,59 \text{ ГПа}.$$

Согласно табличным данным, модуль упругости Юнга для текстолита составляет:  $E_p = 6 \dots 10$  ГПа.

41. Частота звука  $f_*$  ( $\text{с}^{-1}$ ), с которой проникает акустическая (звуковая) волна на заданную глубину или толщину  $\delta$  (м), согласно (33):

$$f_* = (H_A \cdot C_A) / (2\pi \cdot \delta) = (1,414 \cdot 2675) / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,02) = 30115 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

То есть, звуковая (акустическая) волна с частотой меньше  $f_*$  (Гц), будет проникать или проходить через пластину толщиной  $\delta$  (м), а с частотой более  $f_*$  — будет поглощаться материалом пластины (вещества).

Безразмерный волновой комплекс  $H_A = 1,414$  и соответствует доле проникновения гармонических колебаний  $\theta = 0,243$ .

42. Частота колебаний звуковой (акустической) волны, согласно (15):

$$\omega_A = 2\pi f, \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

При частоте звука:  $f_* = 30115 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ :

$$\omega_A = 2 \cdot 3,14 \cdot 30115 = 189122 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

43. Волновое число акустической волны, определяется согласно (19):

$$k_A = \omega_A / C_A, \text{ м}^{-1}.$$

При частоте звука:  $f_* = 30115 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ :

$$k_A = \omega_A / C_A = 189122 / 2675 = 70,7 \text{ м}^{-1}.$$

44. Звукопроводность пластины при определенной частоте  $f$ , толщине пластины  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37):

$$\alpha_{\text{ПР}} = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}.$$

При  $f_* = 30115 \text{ (с}^{-1}\text{)}$  и  $k_A = 70,7 \text{ м}^{-1}$ :

$$\alpha_{\text{ПР}} = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot 70,7 \cdot 0,02} = 0,24.$$

45. Звукоизоляция пластины в децибелах, согласно (38):

$$R_W = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ПР}}), \text{ дБ.}$$

При  $k_A = 70,7 \text{ (м}^{-1}\text{)}$  и  $\alpha_{\text{ПР}} = 0,24$ .

$$R_W = 10 \lg (1/0,24) = 6,14 \text{ дБ.}$$

46. Для наглядности звукофизических свойств материала пластины и для произвольной частоты звука:  $f = 1000 \text{ Гц}$ ,  $f = 5000 \text{ Гц}$ ,  $f = 10000 \text{ Гц}$ ,  $f_*$ , рассчитываются следующие параметры:

- частота колебаний звуковой  $\omega_A$  (акустической) волны, согласно (15);
- волновое число  $k_A$ , для звуковой волны, согласно (19);
- звукопроводность пластины  $\alpha_{\text{ПР}}$  при определенной частоте  $f$ , толщине  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37);
- звукоизоляция пластины  $R_W$  в децибелах, согласно (38).

Расчеты основных звукофизических свойств материала пластины из текстолита сводятся в таблицу 5.4.

Т а б л и ц а 5.4 Основные звукофизические свойства текстолита:

- частота колебаний звуковой волны  $\omega_A$ ;
- волновое число звуковой волны  $k_A$ ;
- звукопроводность  $\alpha_{\text{ПР}}$ ; звукоизоляция  $R_W$ ;
- для частоты звука:  $f = 1000 \text{ Гц}$ ,  $f = 5000 \text{ Гц}$ ;  $f = 10000 \text{ Гц}$ ,  $f_*$ .

Параметр	Частота звука $f$ , Гц			
	$f = 1000$	$f = 5000$	$f = 10000$	$f_* = 30115$
Частота колебаний $\omega_A$ звуковой волны: $\omega_A = 2\pi f$ , (с <sup>-1</sup> )	6280	31400	62800	102868
Волновое число $k_A$ , для звуковой волны: $k_A = \omega_A / C_A$ , м <sup>-1</sup>	2,35	11,74	23,48	70,7
Звукопроводность: $\alpha_{\text{ПР}} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}$	0,954	0,79	0,625	0,24
Звукоизоляция: $R_W = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ПР}})$ , дБ	0,205	1,02	2,04	6,14

### 5.3.2 Теплофизический эксперимент пластины из фторопласта

Физический эксперимент проводится согласно методики 5.2.

1. Использовалась пластина из фторопласта размером  $250 \times 250$  мм.

Толщина пластины:  $\delta = 20$  мм или  $\delta = 0,02$  м.

Объем пластины  $V = 0,25 \times 0,25 \times 0,02 = 0,00125$  м<sup>3</sup>.

Масса пластины  $m = 2,75$  (кг).

Удельная плотность пластины:  $\rho = m/V = 2,75/0,00125 = 2200$  (кг/м<sup>3</sup>).

Поверхностная плотность:  $\rho_{\Pi} = \rho \cdot \delta = 2200 \cdot 0,02 = 44$  (кг/м<sup>2</sup>).

2. В процессе и после завершения эксперимента, полученные параметры для пластины фиксируются на дисплее прибора, а именно:

$\delta$  — толщина пластины:  $\delta = 0,02$  м;

$T_0$  — начальная температура пластины:  $T_0 = 20$  °С;

$T_H$  — температура нагревателя:  $T_H = 35$  °С;

$T_X$  — температура холодильника:  $T_X = 20$  °С;

$T_{\Pi 1}$  — температура на поверхности пластины со стороны нагревателя, при максимальном значении плотности теплового потока:  $T_{\Pi 1} = 35$  °С;

$q_{\Pi}^{max}$  — максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева, в момент наступления упорядоченного теплового режима:  $q_{\Pi}^{max} = 240$  Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_p$  — время, при котором достигается максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины:  $\tau_p = 34$  мин = 2040 с.

$q_{\Pi}^*$  — плотность теплового потока в пластине, в момент наступления стационарного теплового режима:  $q_{\Pi}^* = 150$  Вт/м<sup>2</sup>;

$\tau_*$  — время наступления стационарного режима:  $\tau_* = 42$  мин = 2520 с.

На рис. 5.5 приведено экспериментальное распределение температур и теплового потока на поверхности образца — пластины из фторопласта.

Расчет ТФС фторопласта.

*Стационарный тепловой режим* —  $q_{\Pi}^*$ .

В момент наступления стационарного теплового режима в пластине, то есть при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ , определяются следующие параметры.

1. Температурный напор, перепад или разность температур на внешней и внутренней поверхности пластины:

$$\Delta T_* = (T_H - T_X) = (35 - 20) = 15 \text{ °С.}$$

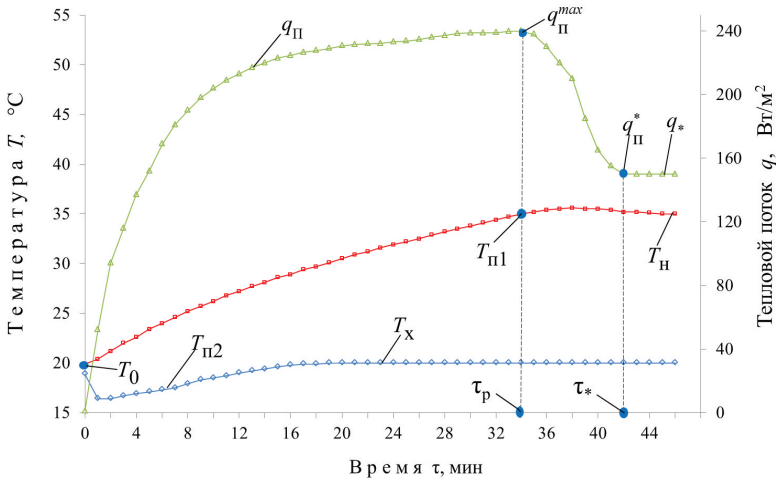


Рис. 5.5. Экспериментальное распределение температур и теплового потока в образце из фторопласта:

$T_H$  — экспериментальное распределение температур со стороны нагревателя, °С;  
 $T_X$  — экспериментальное распределение температур со стороны холодильника, °С;  
 $T_{П1}$  — температура со стороны нагрева при  $q_{П}^{max}$ , °С;  
 $T_{П2}$  — температура со стороны холодильника, °С;  $T_0$  — начальная температура, °С;  
 $q_{П}$  — плотность теплового потока со стороны нагревателя, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $q_{П}^{max}$  — максимальное значение плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $q_*$  — плотность стационарного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\tau_p$  — время достижения максимальной плотности теплового потока  $q_{П}^{max}$ ;  
 $\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима.

2. Теплопроводность, согласно (6):

$$\lambda = (q_{П}^* \cdot \delta) / \Delta T_* = (150 \cdot 0,02) / 15 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

3. Термическое сопротивление теплопроводности, согласно (56):

$$R_{Пл} = \delta / \lambda = 0,02 / 0,2 = 0,1 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}.$$

4. Амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{П}^*$ :

$$\vartheta_{П}^* = 0,5 \Delta T_* = 0,5 \cdot 15 = 7,5 \text{ °С}.$$

5. Коэффициент теплоусвоения  $B_*$ , согласно (47 а) или (56 б):

$$B_* = q_{П}^* / \vartheta_{П}^* = 150 / 7,5 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \text{ или:}$$

$$B_* = 2/R_{\text{пл}} = 2/0,1 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Волновое температурное число в пластине, согласно (52) или (55):

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = 1,414/\delta = 1,414/0,02 = 70,7 \text{ м}^{-1}, \quad \text{или:}$$

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = 0,707 (B_*/\lambda) = 0,707(20/0,2) = 70,7 \text{ м}^{-1}.$$

7. Теплопроводность, согласно (56 в):

$$\lambda = 0,5 (B_* \cdot \delta) = 0,5 (20 \cdot 0,02) = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

8. Объемная теплоемкость, согласно (55 в):

$$(c\rho) = (B_*)^2 \cdot (\tau_*) / (\pi \cdot \lambda) = (20)^2 \cdot (2520) / (3,14 \cdot 0,2) = 1,61 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

9. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho)/\rho = 1,61 \cdot 10^6 / 2200 = 732 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

10. Температуропроводность, согласно (52 а):

$$a = \pi / [2\tau_* (k_{\text{T}}^{\text{пл}})^2] = 3,14 / 2 \cdot 2520 \cdot (70,7)^2 = 0,125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

11. Температуропроводность может определяться также согласно (53):

$$a = 0,785 (\delta^2 / \tau_*) = 0,785 (0,0004 / 2520) = 0,125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Число Фурье, согласно (54), должно численно равняться  $0,785 \approx 0,8$ :

$$Fo = (a \cdot \tau_*) / \delta^2 = 0,125 \cdot 10^{-6} (2520 / 0,0004) = 0,785 \approx 0,8.$$

12. Волновое температурное число может определяться и согласно (20):

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = \sqrt{\pi / (2a \cdot \tau_*)} = (3,14 / 2 \cdot 0,125 \cdot 10^{-6} \cdot 2520)^{0,5} = 70,7 \text{ м}^{-1}.$$

13. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$  связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$\lambda = a \cdot (c\rho) = (0,125 \cdot 10^{-6}) \cdot (1,61 \cdot 10^6) = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,2 / 1,61 \cdot 10^6 = 0,125 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a = 0,2 / 0,125 \cdot 10^{-6} = 1,61 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

14. Тепловая инерция, согласно (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,2 (1,61 \cdot 10^6) = 0,322 \cdot 10^6 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

15. Тепловая активность, согласно (90 б):

$$b_* = \sqrt{b} = (0,322 \cdot 10^6)^{0,5} = 0,567 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

16. Термоизоляция, согласно (43):

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_{\text{T}}^{\text{пл}} \cdot \delta) = 4,34 (70,7 \cdot 0,02) = 6,14 \text{ дБ}.$$

17. Теплопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1 R_{\text{ТЕРМ}}} = 10^{-0,1 \cdot 6,14} = 1/10^{0,614} = 1/4,11 = 0,24.$$

*Максимальная плотность теплового потока на поверхности* —  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$

В момент наступления упорядоченного теплового режима ( $\tau_{\text{р}}$ ) и достижения максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины ( $q_{\text{П}}^{\text{max}}$ ) со стороны нагревателя, определяются следующие параметры.

18. Максимальная амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{\text{П}}^{\text{max}}$ :

$$\vartheta_{\text{П}}^{\text{max}} = 0,5 (T_{\text{П1}} - T_0) = 0,5 (35 - 20) = 7,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

19. Коэффициент теплоусвоения  $B_{\text{р}}$ , согласно (47):

$$B_{\text{р}} = q_{\text{П}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{П}}^{\text{max}} = 240/7,5 = 32 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

20. Волновое температурное число в пластине, согласно (54):

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = B_{\text{р}} / (1,414 \cdot \lambda) = 0,707 (B_{\text{р}} / \lambda) = 0,707 (32/0,2) = 113 \text{ м}^{-1}.$$

21. Объемная теплоемкость, согласно (50 а):

$$(c\rho) = (B_{\text{р}})^2 \cdot (\tau_{\text{р}}) / (2\pi \cdot \lambda) = (32)^2 \cdot (2040) / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,2) = 1,66 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

22. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho) / \rho = 1,66 \cdot 10^6 / 2200 = 754 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

23. Температуропроводность, согласно (50 б):

$$a = \pi / [\tau_{\text{р}} (k_{\text{T}}^{\text{пл}})^2] = 3,14 / 2040 \cdot (113)^2 = 0,121 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

24. Температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), также связаны соотношениями (7) и (9):

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,2 / 1,66 \cdot 10^6 = 0,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a = 0,2 / 0,121 \cdot 10^{-6} = 1,65 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

25. Тепловая инерция, согласно (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,2 (1,66 \cdot 10^6) = 0,332 \cdot 10^6 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

26. Тепловая активность, согласно (90 б):

$$b_* = \sqrt{b} = (0,322 \cdot 10^6)^{0,5} = 0,576 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

27. Термоизоляция, согласно (43)

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_{\text{T}}^{\text{пл}} \cdot \delta) = 4,34 (113 \cdot 0,02) = 9,8 \text{ дБ.}$$

28. Теплопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}} = 10^{-0,1 \cdot 9,81} = 1/10^{0,98} = 1/9,55 = 0,105.$$

29. Расчеты основных теплофизических свойств материала пластины из фторопласта, полученных экспериментально при двух тепловых режимах измерений, сводятся в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 Теплофизические свойства фторопласта  
 $\rho = 2200 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \delta = 0,02 \text{ м.}$

Параметр	Режим при $q_{\text{П}}^*$	Режим при $q_{\text{П}}^{\text{max}}$	Табличные значения
1. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,2	0,2	0,19...0,22
2. Волновое число $k_{\text{T}}^{\text{пл}}$ , м <sup>-1</sup>	70,7	113	—
3. Объемная теплоемкость ( $c_{\text{р}}$ ), кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	1610	1660	1500...1700
4. Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	0,125	0,121	0,11...0,135
5. Тепловая активность $b_*$ , кДж/(с <sup>0,5</sup> ·м <sup>2</sup> ·К)	0,567	0,576	—
6. Термоизоляция $R_{\text{ТЕРМ}}$ , дБ	6,14	9,8	—
7. Теплопроводность $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$	0,24	0,105	—

#### *Расчет ТЗФС фторопласта.*

Следует отметить, что тепло-звукофизические свойства (ТЗФС) материалов, вычисляются для стадии стационарного теплового режима (при  $\tau_*$  и  $q_{\text{П}}^*$ ), когда теплоусвоение  $B_*$  материала стабилизируется.

30. Поверхностная скорость температурной волны, согласно (73):

$$S_{\text{П}} = a/\delta = 0,125 \cdot 10^{-6}/0,02 = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$



31. Плотность тепловой энергии пластины  $\mathcal{E}_T$ , согласно (81):

$$\mathcal{E}_T^{\text{пл}} = q_{\text{пл}}^*/S_{\text{пл}} = 150/6,25 \cdot 10^{-6} = 24 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

32. Объемная теплоемкость ( $c_p$ ), также согласно (78 а):

$$(c_p) = \mathcal{E}_T^{\text{пл}}/\Delta T_* = 24 \cdot 10^6/15 = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

33. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (77):

$$c = \lambda/(S_{\text{пл}} \cdot \rho_{\text{пл}}) = 0,2/(6,25 \cdot 10^{-6} \cdot 44) = 727 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

34. Поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\text{пл}}$ , согласно (82), также связана соотношением:

$$S_{\text{пл}} = q_{\text{пл}}^*/\mathcal{E}_T^{\text{пл}} = 150/24 \cdot 10^6 = 6,25 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}.$$

35. Термическое напряжение на поверхности  $\psi_{\text{пл}}^{\text{пл}}$ , согласно (60), численно пропорционально коэффициенту теплоусвоения  $B$ , при  $\tau_*$  и  $q_{\text{пл}}^*$ :

$$\psi_{\text{пл}}^{\text{пл}} = B_* = 20 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

36. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\text{пл}}^{\text{пл}}$ , согласно (63), обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\text{пл}}$ :

$$\psi_{\text{пл}}^{\text{пл}} = 2/R_{\text{пл}} = 2/0,1 = 20 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

37. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_k$ , согласно (85):

$$\Phi_k = S_{\text{пл}}^2 (\rho_{\text{пл}}/\psi_{\text{пл}}^{\text{пл}}) = (6,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (44/20) = 85,9 \cdot 10^{-12} = 0,0859 \cdot 10^{-9}.$$

38. Звуковая (акустическая) скорость, согласно (86):

$$C_A = S_{\text{пл}}^*/\Phi_k = 0,125 \cdot 10^{-6}/0,0859 \cdot 10^{-9} = 1455 \text{ м/с},$$

где  $S_{\text{пл}}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\text{пл}}^* = a/1\text{м}$ , или  $S_{\text{пл}}^* = 0,125 \cdot 10^{-6}$  м/с.

Согласно табличным данным [3], для фторопласта скорость звука составляет  $C_A = 1400$  м/с; по другим источникам  $C_A = 1500$  м/с. То есть расхождение по скорости звука составляет 3...5 %.

39. Длина свободного пробега фононов, согласно (88):

$$L_{\Phi} = 3a/C_A = 3(0,125 \cdot 10^{-6})/1455 = 0,258 \cdot 10^{-9} = 2,58 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,58 \text{ \AA}.$$

40. Модуль упругости Юнга, согласно (88):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (1455)^2 \cdot 2200 = 4,657 \cdot 10^9 \text{ Па} = 4,657 \text{ ГПа}.$$

Согласно табличным данным, модуль упругости Юнга для фторопласта составляет:  $E_p = 1 \dots 5$  ГПа.

41. Частота звука  $f_*$  ( $c^{-1}$ ), с которой проникает акустическая (звуковая) волна на заданную глубину или толщину  $\delta$  (м), согласно (33):

$$f_* = (H_A \cdot C_A) / (2\pi \cdot \delta) = (1,414 \cdot 1455) / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,02) = 16380 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

То есть, звуковая (акустическая) волна с частотой меньше  $f_*$  (Гц), будет проникать или проходить через пластину толщиной  $\delta$  (м), а с частотой более  $f_*$  — будет поглощаться материалом пластины (вещества).

Безразмерный волновой комплекс  $H_A = 1,414$  и соответствует доле проникновения гармонических колебаний  $\theta = 0,243$ .

42. Частота колебаний звуковой (акустической) волны, согласно (15):

$$\omega_A = 2\pi f, \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

При частоте звука:  $f_* = 16380 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ :

$$\omega_A = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 16380 = 102868 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

43. Волновое число акустической волны, определяется согласно (19):

$$k_A = \omega_A / C_A, \text{ м}^{-1}.$$

При частоте звука:  $f_* = 16380 \text{ (с}^{-1}\text{)}$ :

$$k_A = \omega_A / C_A = 102868 / 1455 = 70,7 \text{ м}^{-1}.$$

44. Звукопроводность пластины при определенной частоте  $f$ , толщине пластины  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37):

$$\alpha_{\text{ПР}} = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}.$$

При  $f_* = 16380 \text{ (с}^{-1}\text{)}$  и  $k_A = 70,7 \text{ м}^{-1}$ :

$$\alpha_{\text{ПР}} = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot 70,7 \cdot 0,02} = 0,24.$$

45. Звукоизоляция пластины в децибелах, согласно (38):

$$R_W = 10 \lg (1/\alpha_{\text{ПР}}), \text{ дБ}.$$

При  $k_A = 70,7 \text{ (м}^{-1}\text{)}$  и  $\alpha_{\text{ПР}} = 0,24$ .

$$R_W = 10 \lg (1/0,24) = 6,14 \text{ дБ}.$$

46. Для наглядности звукофизических свойств материала пластины и для произвольной частоты звука:  $f = 1000$  Гц,  $f = 5000$  Гц,  $f = 10000$  Гц,  $f^*$ , рассчитываются следующие параметры:

- частота колебаний звуковой  $\omega_A$  (акустической) волны, согласно (15);
- волновое число  $k_A$ , для звуковой волны, согласно (19);
- звукопроводность пластины  $\alpha_{\text{пр}}$  при определенной частоте  $f$ , толщине  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37);
- звукоизоляция пластины  $R_W$  в децибелах, согласно (38).

Расчеты основных звукофизических свойств материала пластины из фторопласта сводятся в таблицу 5.6.

Т а б л и ц а 5.6 Основные звукофизические свойства фторопласта:

- частота колебаний звуковой волны  $\omega_A$ ;
- волновое число звуковой волны  $k_A$ ;
- звукопроводность  $\alpha_{\text{пр}}$ ; звукоизоляция  $R_W$ ;
- для частоты звука:  $f = 1000$  Гц,  $f = 5000$  Гц;  $f = 10000$  Гц,  $f^*$ .

Параметр	Частота звука $f$ , Гц			
	$f = 1000$	$f = 5000$	$f = 10000$	$f^* = 16380$
Частота колебаний $\omega_A$ звуковой волны: $\omega_A = 2\pi f$ , (с <sup>-1</sup> )	6280	31400	62800	102868
Волновое число $k_A$ , для звуковой волны: $k_A = \omega_A/C_A$ , м <sup>-1</sup>	4,32	21,58	43,16	70,7
Звукопроводность: $\alpha_{\text{пр}} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}$	0,917	0,65	0,42	0,24
Звукоизоляция: $R_W = 10 \lg(1/\alpha_{\text{пр}})$ , дБ	0,375	1,87	3,75	6,14

### 5.3.3 Теплофизический эксперимент пластины из оргстекла

Физический эксперимент проводится согласно методики 5.2.

1. Использовалась пластина из оргстекла размером 250×250 мм.

Толщина пластины:  $\delta = 28,4$  мм или  $\delta = 0,0284$  м.

Объем пластины  $V = 0,25 \times 0,25 \times 0,0284 = 0,001775$  м<sup>3</sup>.

Масса пластины  $m = 2,1$  (кг).

Удельная плотность пластины:  $\rho = m/V = 2,1/0,001775 = 1183$  (кг/м<sup>3</sup>).

Поверхностная плотность:  $\rho_{\text{п}} = \rho \cdot \delta = 1183 \cdot 0,0284 = 33,6$  (кг/м<sup>2</sup>).

2. В процессе и после завершения эксперимента, полученные параметры для пластины фиксируются на дисплее прибора, а именно:

$\delta$  — толщина пластины:  $\delta = 0,0284$  м;

$T_0$  — начальная температура пластины:  $T_0 = 20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $T_H$  — температура нагревателя:  $T_H = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $T_X$  — температура холодильника:  $T_X = 16 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $T_{П1}$  — температура на поверхности пластины со стороны нагревателя, при максимальном значении плотности теплового потока:  $T_{П1} = 44 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  
 $q_{П}^{max}$  — максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева, в момент наступления упорядоченного теплового режима:  $q_{П}^{max} = 266 \text{ Вт/м}^2$ ;  
 $\tau_p$  — время, при котором достигается максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины:  $\tau_p = 69 \text{ мин} = 4140 \text{ с}$ .  
 $q_{П}^*$  — плотность теплового потока в пластине, в момент наступления стационарного теплового режима:  $q_{П}^* = 196 \text{ Вт/м}^2$ ;  
 $\tau_*$  — время наступления стационарного режима:  $\tau_* = 90 \text{ мин} = 5400 \text{ с}$ .

На рис. 5.6 приведено экспериментальное распределение температур и теплового потока на поверхности образца — пластины из оргстекла.

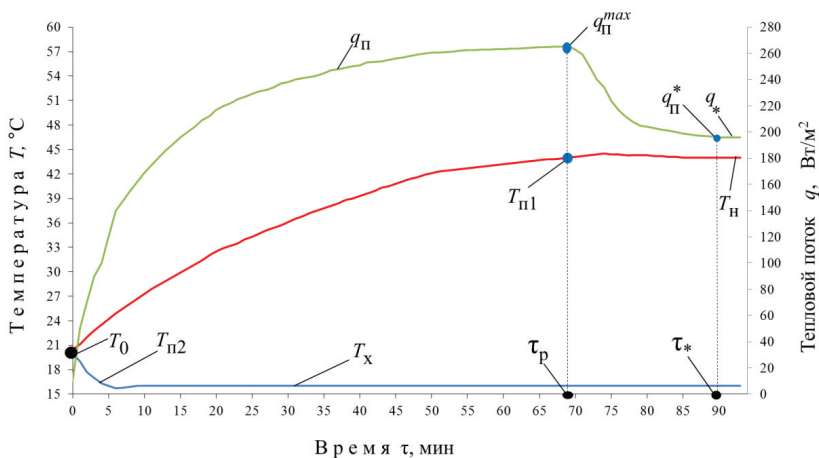


Рис. 5.6. Экспериментальное распределение температур и теплового потока в образце из оргстекла:

$T_H$  — экспериментальное распределение температур со стороны нагревателя,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $T_X$  — экспериментальное распределение температур со стороны холодильника,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $T_{П1}$  — температура со стороны нагрева при  $q_{П}^{max}$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  
 $T_{П2}$  — температура со стороны холодильника,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_0$  — начальная температура,  $^\circ\text{C}$ ;

$q_{\Pi}$  — плотность теплового потока со стороны нагревателя, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $q_{\Pi}^{max}$  — максимальное значение плотности теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $q_*$  — плотность стационарного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\tau_p$  — время достижения максимальной плотности теплового потока  $q_{\Pi}^{max}$ ;  
 $\tau_*$  — время наступления стационарного теплового режима.

Расчет ТФС оргстекла.

*Стационарный тепловой режим* —  $q_{\Pi}^*$ .

В момент наступления стационарного теплового режима в пластине, то есть при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ , определяются следующие параметры.

1. Температурный напор, перепад или разность температур на внешней и внутренней поверхности пластины:

$$\Delta T_* = (T_H - T_X) = 44 - 16 = 28 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. Теплопроводность, согласно (6):

$$\lambda = (q_{\Pi}^* \cdot \delta) / \Delta T_* = (196 \cdot 0,0284) / 28 = 0,1988 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

3. Термическое сопротивление теплопроводности, согласно (56):

$$R_{\Pi\lambda} = \delta / \lambda = 0,0284 / 0,2 = 0,142 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)} / \text{Вт}.$$

4. Амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{\Pi}^*$ :

$$\vartheta_{\Pi}^* = 0,5 \Delta T_* = 0,5 \cdot 28 = 14 \text{ }^\circ\text{C}.$$

5. Коэффициент теплоусвоения  $B_*$ , согласно (47 а) или (56 б):

$$B_* = q_{\Pi}^* / \vartheta_{\Pi}^* = 196 / 14 = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \text{ или:}$$

$$B_* = 2 / R_{\Pi\lambda} = 2 / 0,142 = 14,08 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Волновое температурное число в пластине, согласно (52) или (55):

$$k_T^{\Pi\lambda} = 1,414 / \delta = 1,414 / 0,0284 = 49,8 \approx 50 \text{ м}^{-1}.$$

$$k_T^{\Pi\lambda} = 0,707 (B_* / \lambda) = 0,707 (14 / 0,2) = 49,5 \approx 50 \text{ м}^{-1}.$$

7. Теплопроводность также возможно вычислять по одной из формул (55) или (56 в):

$$\lambda = 0,707 (B_* / k_T^{\Pi\lambda}) = 0,707 (14 / 50) = 0,1988 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

$$\text{или: } \lambda = 0,5 (B_* \cdot \delta) = 0,5 (14 \cdot 0,0284) = 0,1988 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

8. Объемная теплоемкость, согласно (55 в):

$$(c\rho) = (B_*)^2 \cdot (\tau_*) / (\pi \cdot \lambda) = (14)^2 \cdot 5400 / (3,14 \cdot 0,2) = 1,685 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

9. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho) / \rho = 1,685 \cdot 10^6 / 1183 = 1425 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

10. Температуропроводность, согласно (52 а):

$$a = \pi / [2\tau_* (k_T^{\text{пл}})^2] = 3,14 / (2 \cdot 5400) \cdot (49,5)^2 = 0,1187 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

11. Температуропроводность может определяться также согласно (53):

$$a = 0,785 (\delta^2 / \tau_*) = 0,785 \cdot (0,0284)^2 / 5400 = 0,117 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Число Фурье, согласно (54), должно численно равняться  $0,785 \approx 0,8$ :

$$Fo = (a \cdot \tau_*) / \delta^2 = (0,1187 \cdot 10^{-6}) \cdot (5400) / (0,0284)^2 = 0,794 \approx 0,8.$$

12. Волновое температурное число может определяться и согласно (20):

$$k_T^{\text{пл}} = \sqrt{\pi / (2a \cdot \tau_*)} = (3,14 / 2 \cdot 0,1187 \cdot 10^{-6} \cdot 5400)^{0,5} = 49,5 \approx 50 \text{ м}^{-1}.$$

13. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$  связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$\lambda = a \cdot (c\rho) = (0,1187 \cdot 10^{-6}) \cdot (1,685 \cdot 10^6) = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,2 / 1,685 \cdot 10^6 = 0,119 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a = 0,2 / 0,1187 \cdot 10^{-6} = 1,685 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

14. Тепловая инерция, согласно (89):

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,2 (1,685 \cdot 10^6) = 0,337 \cdot 10^6 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

15. Тепловая активность, согласно (90 б):

$$b_* = \sqrt{b} = \sqrt{0,337 \cdot 10^6} = 0,58 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

16. Термоизоляция, согласно (43):

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{\text{пл}} \cdot \delta) = 4,34 (50 \cdot 0,0284) = 6,16 \text{ дБ}.$$

17. Термопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}} = 10^{-0,1 \cdot 6,16} = 1 / 10^{0,616} = 1 / 4,13 = 0,24.$$

Максимальная плотность теплового потока на поверхности —  $q_{\Pi}^{max}$

В момент наступления упорядоченного теплового режима ( $\tau_p$ ) и достижения максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины ( $q_{\Pi}^{max}$ ) со стороны нагревателя, определяются следующие параметры.

18. Максимальная амплитуда колебаний температурной волны  $\vartheta_{\Pi}^{max}$ :

$$\vartheta_{\Pi}^{max} = 0,5 (T_{\Pi 1} - T_0) = 0,5 (44 - 20,5) = 11,75 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

19. Коэффициент теплоусвоения  $B_p$ , согласно (47):

$$B_p = q_{\Pi}^{max} / \vartheta_{\Pi}^{max} = 265 / 11,75 = 22,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

20. Волновое температурное число в пластине, согласно (54):

$$k_T^{пл} = B_p / (1,414 \cdot \lambda) = 0,707 (B_p / \lambda) = 0,707 (22,6 / 0,2) = 80 \text{ м}^{-1}.$$

21. Объемная теплоемкость, согласно (50 а):

$$(c_p) = (B_p)^2 \cdot (\tau_p) / (2\pi \cdot \lambda) = (22,6)^2 \cdot (4140) / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,2) = 1,68 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$$

22. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c_p) / \rho = 1,684 \cdot 10^6 / 1183 = 1423 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

23. Температуропроводность, согласно (50 б):

$$a = \pi / [\tau_p (k_T^{пл})^2] = 3,14 / 4140 \cdot (80)^2 = 0,1185 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

24. Температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c_p$ ), также связаны соотношениями (7) и (9):

$$a = \lambda / (c_p) = 0,2 / 1,684 \cdot 10^6 = 0,119 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c_p) = \lambda / a = 0,2 / 0,1185 \cdot 10^{-6} = 1,687 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

25. Тепловая инерция, согласно (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c_p) = 0,2 (1,684 \cdot 10^6) = 0,337 \cdot 10^6 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

26. Тепловая активность, согласно (90 б):

$$b_* = \sqrt{b} = (0,337 \cdot 10^6)^{0,5} = 0,58 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

27. Термоизоляция, согласно (43)

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{пл} \cdot \delta) = 4,34 (80 \cdot 0,0284) = 9,86 \text{ дБ}.$$

28. Термопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}} = 10^{-0,1 \cdot 9,86} = 1/10^{0,986} = 1/9,68 = 0,103 \approx 0,1.$$

29. Расчеты теплофизических свойств оргстекла, полученных экспериментально при двух тепловых режимах измерений, сводятся в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 Теплофизические свойства оргстекла  
 $\rho = 1183 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \delta = 0,0284 \text{ м.}$

Параметр	Режим при $q_{\Pi}^*$	Режим при $q_{\Pi}^{\text{max}}$	Табличные значения
1. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,2	0,2	0,19...0,21
2. Волновое число $k_{\Gamma}^{\text{пл}}$ , м <sup>-1</sup>	50	80	—
3. Объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	1685	1684	1500...1700
4. Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	0,1187	0,1185	0,11...0,125
5. Тепловая активность $b_*$ , кДж/(с <sup>0,5</sup> ·м <sup>2</sup> ·К)	0,58	0,58	—
6. Термоизоляция $R_{\text{ТЕРМ}}$ , дБ	6,16	9,86	—
7. Термопроводность $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$	0,24	0,1	—

*Расчет ТЗФС материала.*

Тепло-звукофизические свойства (ТЗФС) материалов, вычисляются для стадии стационарного теплового режима (при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ ), когда теплоусвоение  $B$  материала стабилизируется.

30. Поверхностная скорость температурной волны, согласно (73):

$$S_{\Pi} = a/\delta = 0,1187 \cdot 10^{-6}/0,0284 = 4,18 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

31. Плотность тепловой энергии пластины  $\mathcal{E}_{\Gamma}$ , согласно (81):

$$\mathcal{E}_{\Gamma}^{\text{пл}} = q_{\Pi}^*/S_{\Pi} = 196/4,18 \cdot 10^{-6} = 46,9 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

32. Объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), также согласно (78 а):

$$(c\rho) = \mathcal{E}_{\Gamma}^{\text{пл}}/\Delta T_* = 46,9 \cdot 10^6/28 = 1,675 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К).}$$

33. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (77):

$$c = \lambda/(S_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}) = 0,2/(4,18 \cdot 10^{-6} \cdot 33,6) = 1424 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К).}$$



34. Поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$ , согласно (82), также связана соотношением:

$$S_{\Pi} = q_{\Pi}^* / \varepsilon_{\Pi}^{\text{пл}}, = 196/46,9 = 4,18 \text{ м/с.}$$

35. Термическое напряжение на поверхности  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}$ , согласно (60), численно пропорционально коэффициенту теплоусвоения  $B$ , при  $\tau_*$  и  $q_{\Pi}^*$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = B_* = 14 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

36. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}$ , согласно (63), обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\Pi\text{Л}}$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = 2/R_{\Pi\text{Л}} = 1/0,5R_{\Pi\text{Л}} = 2/0,142 = 14,08 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

37. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{К}}$ , согласно (85):

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \psi_{\Pi}^{\text{пл}}) = (4,18 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (33,6/14) = 41,93 \cdot 10^{-12} = 0,04193 \cdot 10^{-9}.$$

38. Звуковая (акустическая) скорость, согласно (86):

$$C_{\text{А}} = S_{\Pi}^* / \Phi_{\text{К}} = 0,1187 \cdot 10^{-6} / 0,04193 \cdot 10^{-9} = 2831 \text{ м/с,}$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1 = 0,1187 \cdot 10^{-6} / 1 = 0,1187 \cdot 10^{-6}$  м/с.

Согласно табличным данным [3], для оргстекла (плексиглас), скорость звука составляет  $C_{\text{А}} = 2820$  м/с; по другим источникам  $C_{\text{А}} = 2680$  м/с. То есть расхождение по скорости звука составляет 2,5...3 %.

39. Длина свободного пробега фононов, согласно (88):

$$L_{\Phi} = 3a / C_{\text{А}}, = 3 \cdot (0,1187 \cdot 10^{-6}) / 2831 = 0,126 \cdot 10^{-9} = 1,26 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 1,26 \text{ \AA}$$

40. Модуль упругости Юнга, согласно (88):

$$E_{\text{р}} = C_{\text{А}}^2 \cdot \rho = (2831)^2 \cdot 1183 = 9,5 \cdot 10^9 \text{ Па} = 9,5 \text{ ГПа.}$$

Согласно табличным данным, модуль упругости Юнга для оргстекла составляет:  $E_{\text{р}} = 5...9$  ГПа.

41. Частота звука  $f_*$  ( $\text{с}^{-1}$ ), с которой проникает акустическая (звуковая) волна на заданную глубину или толщину  $\delta$  (м), согласно (33):

$$f_* = (H_{\text{А}} \cdot C_{\text{А}}) / (2\pi \cdot \delta) = (1,414 \cdot 2831) / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,0284) = 22445 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

То есть, звуковая (акустическая) волна с частотой меньше  $f_*$  (Гц), будет проникать или проходить через пластину толщиной  $\delta$  (м), а с частотой более  $f_*$  — будет поглощаться материалом пластины (вещества).

Безразмерный волновой комплекс  $H_A = 1,414$  и соответствует доле проникновения гармонических колебаний  $\theta = 0,243$ .

42. Частота колебаний звуковой (акустической) волны, согласно (15):

$$\omega_A = 2\pi f, (\text{с}^{-1}).$$

При частоте звука:  $f_* = 22445$  ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$\omega_A = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 22445 = 140952 (\text{с}^{-1}).$$

43. Волновое число акустической волны, определяется согласно (19):

$$k_A = \omega_A / C_A, \text{ м}^{-1}.$$

При частоте звука:  $f_* = 22445$  ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$k_A = \omega_A / C_A = 140952 / 2831 = 49,8 \text{ м}^{-1}.$$

44. Звукопроводность пластины при определенной частоте  $f$ , толщине пластины  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37):

$$\alpha_{\text{пр}} = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}.$$

При:  $f_* = 22445$  ( $\text{с}^{-1}$ ),  $\delta = 0,0284$  м,  $k_A = 49,8 \text{ м}^{-1}$ :

$$\alpha_{\text{пр}} = 10^{-M \cdot k_A \cdot \delta} = 10^{-0,434 \cdot 49,8 \cdot 0,0284} = 10^{-0,614} = 0,243.$$

45. Звукоизоляция пластины в децибелах, согласно (38):

$$R_W = 10 \lg (1/\alpha_{\text{пр}}) = 10 \lg (1/0,247) = 6,07 \text{ дБ}.$$

46. Для наглядности звукофизических свойств материала пластины и для произвольной частоты звука:  $f = 1000$  Гц,  $f = 5000$  Гц,  $f = 10000$  Гц,  $f_*$ , рассчитываются следующие параметры:

- частота колебаний звуковой  $\omega_A$  (акустической) волны, согласно (15);
- волновое число  $k_A$ , для звуковой волны, согласно (19);
- звукопроводность пластины  $\alpha_{\text{пр}}$  при определенной частоте  $f$ , толщине  $\delta$ , скорости звука  $C_A$ , согласно (37);
- звукоизоляция пластины  $R_W$  в децибелах, согласно (38).

Расчеты основных звукофизических свойств материала пластины сводятся в таблицу 5.8.

Т а б л и ц а 5.8 Основные ЗФС свойства пластины из оргстекла:

- частота колебаний звуковой волны  $\omega_A$ ;
- волновое число звуковой волны  $k_A$ ;
- звукопроводность  $\alpha_{\text{пр}}$ ; звукоизоляция  $R_W$ ;
- для частоты звука:  $f = 1000$  Гц,  $f = 5000$  Гц;  $f = 10000$  Гц,  $f_s$ .

Параметр	Частота звука $f$ , Гц			
	$f = 1000$	$f = 5000$	$f = 10000$	$f_s = 22445$
Частота колебаний $\omega_A$ звуковой волны: $\omega_A = 2\pi f$ , (с <sup>-1</sup> )	6280	31400	62800	134926
Волновое число $k_A$ , для звуковой волны: $k_A = \omega_A/C_A$ , м <sup>-1</sup>	2,29	11,47	22,9	49,3
Звукопроводность: $\alpha_{\text{пр}} = 10^{-0,434 \cdot k_A \cdot \delta}$	$10^{-0,028}$	$10^{-0,14}$	$10^{-0,28}$	$10^{-0,61}$
Звукоизоляция: $R_W = 10 \lg(1/\alpha_{\text{пр}})$ , дБ	0,28	1,4	2,8	6,1

## 5.4 Выводы по главе 5

1. Разработано устройство FOKUS для экспериментального определения комплекса тепло-звукофизических свойств (ТЗФС) твердых строительных материалов и изделий, на образцах в виде пластины, методом температурных волн и неразрушающего контроля.

2. Разработана методика VA экспериментального определения теплозвукофизических свойств строительных материалов и изделий методом теплозвуковой аналогии на образцах — пластинах.

3. Приведены результаты теплофизических и звукофизических экспериментов пластин из текстолита, фторопласта и оргстекла. Полученные экспериментальные значения ТЗФС согласуются со справочными данными, а расхождение составляет не более 5 %.

4. Полученные экспериментально тепло-звукофизические свойства с помощью двух режимов измерений показывают минимальное расхождение значений, высокую точность и надёжность разработанного авторами метода.

5. Разработанный авторами способ температурных волн и неразрушающего контроля, методом тепло-звуковой аналогии на образцах — пластинах, позволяет значительно сократить время проведения эксперимента и более точно определять ТЗФС по сравнению с другими методами.

## ГЛАВА 6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО-ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ МЕТОДОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН

### 6.1 Температуры и тепловые потоки в ограждениях зданий

При гармоническом подводе теплоты к поверхности ограждения зданий в течении суток возможны различные варианты распределения температур и удельных тепловых потоков. Обычно имеется однородная стенка толщиной  $\delta$ , удельной плотностью  $\rho$ , теплопроводностью  $\lambda$ , температуропроводностью  $a$  и объемной теплоемкостью ( $c\rho$ ). При двухстороннем колебании температур на наружной и внутренней поверхности ограждения происходит наложение косинусоид, что практически все тепловые процессы сводят к ряду возможных вариантов эксплуатации здания.

*Вариант 1. Стационарный тепловой режим.*

Стационарный тепловой режим соблюдается, когда температура на улице (снаружи) и внутри помещения здания остаются постоянными. Соответственно температура на наружной  $T_{n1}$  и на внутренней  $T_{n2}$  поверхности ограждения здания остаются постоянными во времени.

Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания в стационарном тепловом режиме приведены на рис. 6.1.

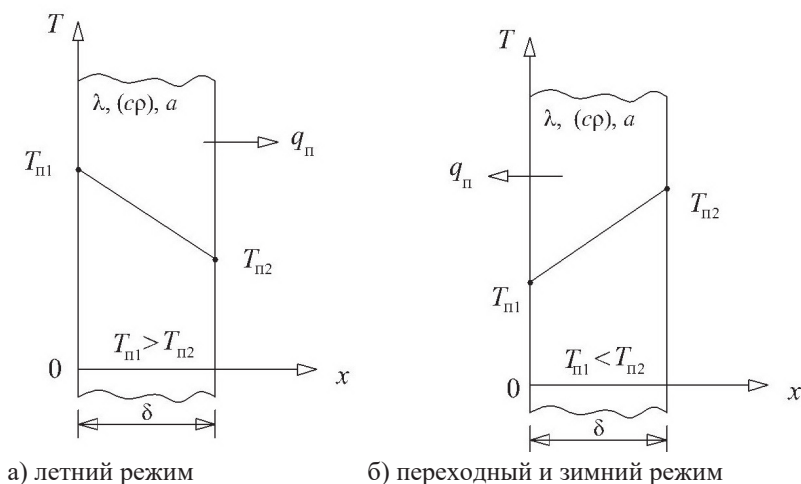


Рис. 6.1 Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания в стационарном тепловом режиме

В этом случае возможно два режима эксплуатации: когда  $T_{n1} > T_{n2}$  (летний режим) или  $T_{n1} < T_{n2}$  (переходный и зимний режим). Вектор удельного теплового потока  $q_n$  в этих случаях направлен от поверхности ограждения с большей температурой к поверхности с меньшей температурой.

Если начало координат ограждения оставить в одном положении, как показано на рис. 6.1, то в случае летнего режима (а), тепловая энергия идет от наружной поверхности ограждения здания к внутренней, а проникающая теплопередача направлена внутрь помещения. Распределение температуры внутри плоской стенки ограждения в случае (а) имеет линейный характер.

$$T_x = T_{n1} - \frac{T_{n1} - T_{n2}}{\delta} \cdot x.$$

Тепловой поток на внутренней и на наружной поверхности ограждения остается постоянным:

$$q_n^1 = \frac{\lambda}{\delta} (T_{n1} - T_{n2}).$$

В зимний и переходный периоды года (рис. 6.1, б), тепловая энергия идет от внутренней поверхности ограждения здания к наружной, а проникающая теплопередача направлена наружу ограждения здания. Распределение температуры внутри плоской стенки ограждения и удельный тепловой поток в случае (б) имеет вид:

$$T_x = T_{n2} - \frac{T_{n2} - T_{n1}}{\delta} (\delta - x);$$

$$q_n = \frac{\lambda}{\delta} (T_{n2} - T_{n1}).$$

*Вариант 2.* Режим, когда температура на наружной поверхности ограждения здания  $T_{n1}$  остается постоянной, а температура на внутренней поверхности  $T_{n2}$  изменяется по гармоническому закону:

$$\vartheta_x = \vartheta_{n2}^{\max} \cdot e^{-kx}.$$

Такой режим возможен при циклическом изменении температуры воздуха внутри помещения здания, например, при включении и выключении системы кондиционирования воздуха, сплит систем. Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания при гармоническом изменении температуры внутри помещения приведены на рис. 6.2.

В этом случае возможны два режима эксплуатации:

а)  $T_{n2}^* > T_{n1}$  (переходный и зимний режим);

б)  $T_{n2}^* < T_{n1}$  (летний режим).

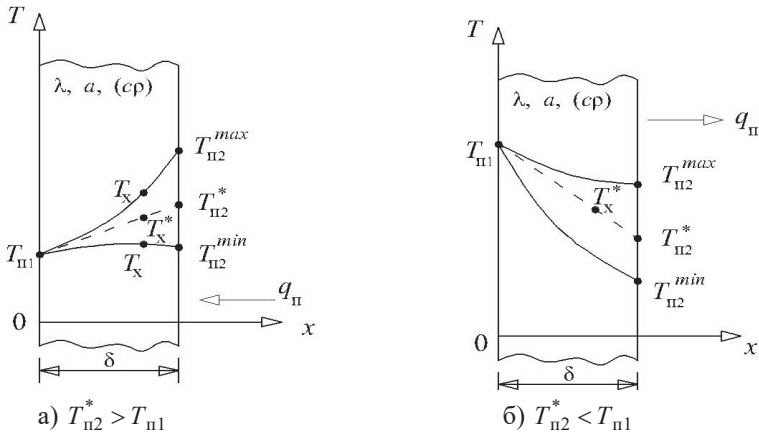


Рис. 6.2 Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения здания при гармоническом изменении температуры внутри помещения:

Вектор удельного теплового потока  $q_{п}$  направлен от поверхности ограждения с большей температурой к поверхности с меньшей температурой, а средняя температура  $T_x^*$  — это температура между максимальным и минимальным отклонением по сечению ограждения здания.

Избыточная температура на внутренней поверхности имеет вид:

$$\vartheta_{п2}^{\max} = T_{п2}^{\max} - T_{п2}^* = T_{п2}^{*\max} - T_{п2}^{\min} = 0,5(T_{п2}^{\max} - T_{п2}^{\min}).$$

Если начало координат ограждения здания оставить в положении на наружной поверхности стены, как показано на рис. 6.2, то в случае противоположного направления оси  $x$  и распределения температурной волны, во всех выражениях необходимо вместо  $x$  подставить  $(\delta - x)$ .

Распределение амплитуды температурной волны по сечению ограждения имеет вид:

$$\vartheta_x = \vartheta_{п2}^{\max} \cdot e^{-k(\delta-x)}.$$

где  $k$  — волновое число, определяемое по формуле (21).

Распределение колебаний температуры по сечению ограждения, относительно средней  $T_x^*$  температуры определится из выражения:

$$T_x = T_x^* \pm \vartheta_{п2}^{\max} \cdot e^{-k(\delta-x)}.$$

Волновое число для стенки ограждения  $k$ , согласно (21), будет равно:

$$k = \sqrt{\pi/(a \cdot z)}, \text{ м}^{-1}.$$

Удельный тепловой поток на внутренней поверхности ограждения здания в случае «а» (рис. 6.2) определится из выражения:

$$q_{\text{п}} = -\lambda \left( \frac{dT_X}{dx} \right)_{X=\delta} = q_{\text{п}2}^* + \lambda \cdot \vartheta_{\text{п}2}^{\text{max}} \cdot k,$$

где  $q_{\text{п}2}^*$  — среднее значение теплового потока на внутренней поверхности ограждения, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  — теплопроводность материала ограждения, Вт/(м·К);  $\vartheta_{\text{п}2}^{\text{max}}$  — избыточная температура на внутренней поверхности ограждения, °С;  $k$  — волновое число, определяемое по формуле (21).

Удельный тепловой поток на внутренней поверхности ограждения здания в случае «б» (рис. 6.2) определится из выражения:

$$q_{\text{п}} = \lambda \cdot \vartheta_{\text{п}2}^{\text{max}} \cdot k - q_{\text{п}2}^*.$$

*Вариант 3.* Период ограждений зданий, когда температура в помещении и на внутренней поверхности ограждения здания  $T_{\text{п}2}$  остается постоянной, а температура на наружной поверхности (снаружи) ограждения здания изменяется по гармоническому закону.

Распределение температуры и удельного теплового потока по толщине ограждения при гармоническом изменении температуры снаружи приведены на рис. 6.3, где  $T_x^*$  — температура между максимальным и минимальным отклонением (средняя) по сечению ограждения здания.

Причем, возможно три случая эксплуатации ограждений здания:

- а)  $T_{\text{п}1}^* < T_{\text{п}2}$  (зимний отопительный режим);
- б)  $T_{\text{п}1}^* \approx T_{\text{п}2}$  (летний и переходный режим);
- в)  $T_{\text{п}1}^* > T_{\text{п}2}$  (жаркий летний режим).

Вектор удельного теплового потока  $q_{\text{п}}$  в этих случаях направлен от поверхности ограждения с большей температурой к поверхности с меньшей температурой. Распределение амплитуды температурной волны и снаружи, и по сечению ограждения здания, изменяется по гармоническому закону:

$$\vartheta_x = \vartheta_{\text{п}1}^{\text{max}} \cdot e^{-kx}.$$

Избыточная температура на внешней поверхности ограждения здания (снаружи) имеет вид:

$$\vartheta_{\text{п}1}^{\text{max}} = T_{\text{п}1}^{\text{max}} - T_{\text{п}1}^* = T_{\text{п}1}^* - T_{\text{п}1}^{\text{min}} = 0,5(T_{\text{п}1}^{\text{max}} - T_{\text{п}1}^{\text{min}}).$$

Распределение колебаний температуры по сечению ограждения, относительно средней  $T_x^*$  температуры определится из выражения:

$$T_x = T_x^* \pm \vartheta_{\text{п}1}^{\text{max}} \cdot e^{-kx},$$

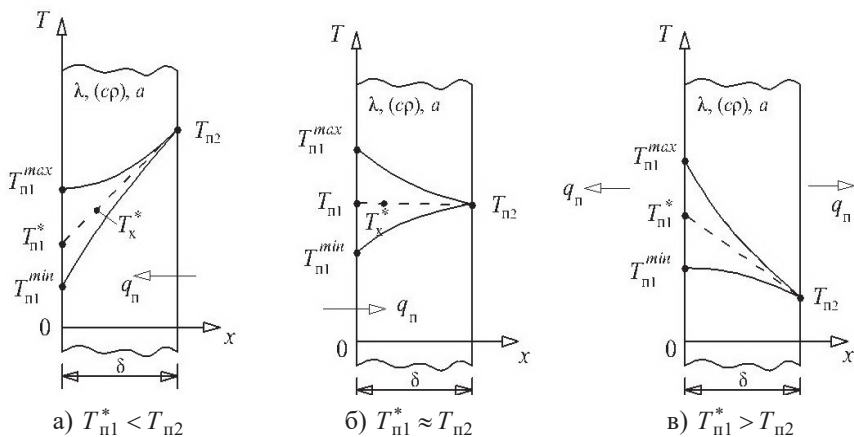


Рис. 6.3 Распределение температуры и теплового потока по толщине ограждения здания при гармоническом изменении температуры снаружи

Удельный тепловой поток на внешней поверхности ограждения здания (снаружи) в случае «а» (рис. 6.3), определится из выражения:

$$q_n = -\lambda \left( \frac{dT_x}{dx} \right)_{x=0} = q_{n1}^* + \lambda \cdot \vartheta_{n1}^{\max} \cdot k,$$

где  $q_{n1}^*$  — среднее значение теплового потока на внешней поверхности ограждения, Вт/м<sup>2</sup>.

Удельный тепловой поток на внешней поверхности ограждения здания в случае «б» (рис. 6.3), который встречается в переходный и летний период эксплуатации здания, определится из выражения:

$$q_n = \lambda \cdot \vartheta_{n1}^{\max} \cdot k - q_{n1}^*.$$

Удельный тепловой поток на внешней поверхности ограждения в случае «в» (рис. 6.3), который встречается в жаркий летний режим эксплуатации здания, определится из выражения:

$$q_n = 0,5 \cdot \lambda \cdot \vartheta_{n1}^{\max} \cdot k.$$

Важно отметить, что в жаркий летний период эксплуатации, ограждение здания нагревается в «дневные» часы до температур выше, чем внутренняя температура ограждения (помещения), а в остальные «ночные» часы теплота от ограждения здания в основном равномерно передается как наружу ограждения здания, так и внутрь помещения.

*Вариант 4.* Тепловое одновременное воздействие на ограждения здания всех трех предыдущих случаев формулируется так: тепловой поток на поверх-



ности ограждения после всех температурных возмущений равен сумме первоначального теплового потока и всех потоков, вызванных на внешней и внутренней поверхности ограждения здания.

## 6.2 Методика экспериментального определения ТЗФС ограждений зданий методом температурных волн

Физический эксперимент или экспериментальное подтверждение основ тепло-звуковой аналогии, на основе полученных закономерностей температурных волн, а также определение тепло-звукофизических свойств (ТЗФС) в работе проводился на ограждении здания из силикатного кирпича: кладка двух кирпичей и силикатной плитки, общей толщиной  $\delta = 0,6$  м.

Контрольно-измерительное оборудование включает в себя переносной измеритель тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток», с датчиками температур и теплового потока, которые одновременно выполняют замеры плотности теплового потока на поверхности ограждения здания в течение суток, а также температуры на наружной и внутренней поверхности стены — ограждения здания. Кроме того, проводилась регистрация наружной температуры воздуха и внутренней температуры воздуха в помещении.

Основные характеристики измерителя теплофизических параметров ИТП-МГ4 «Поток» приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 Основные характеристики ИТП-МГ4 «Поток»

Наименование характеристик	ИТП-МГ4 «Поток»
1	2
Диапазон измерения плотности тепловых потоков, Вт/м <sup>2</sup>	10...500
Диапазон измерения температуры, °С	(– 30)...(+ 70)
Диапазон измерения сопротивления теплопередаче, (м <sup>2</sup> ·К)/Вт	0,05...8
Относительная погрешность измерения плотности тепловых потоков, менее, %	± 6,0
Основная абсолютная погрешность измерения температуры, не более, °С	± 0,2

Прибор ИТП-МГ4 предназначен для измерения плотности тепловых потоков, проходящих через однослойные и многослойные ограждающие конструкции зданий и сооружений по ГОСТ 25380, через облицовку и теплоизоляцию ограждений зданий, сооружений и энергообъектов при экспериментальном исследовании и в условиях эксплуатации.

Прибор позволяет измерять температуру поверхности ограждения и воздуха внутри и снаружи ограждения помещения, а также определять термическое сопротивление ограждающих конструкций зданий сооружений и изделий по ГОСТ 26254 и ГОСТ 26602.1.

Прибор ИТП-МГ4 «Поток» обеспечивает выполнение измерений в оперативном режиме, а также в режиме наблюдения с автоматической регистрацией тепловых потоков и температуры через интервалы времени, установленные пользователем. Прибор оснащен функцией передачи данных на ЭВМ или ПК и часами реального времени. Получаемая в процессе измерений информация автоматически архивируется и маркируется датой и временем измерения.

Используя переносной тепломер, устанавливаются датчики температур и теплового потока, выполняются замеры плотности теплового потока на поверхности ограждения здания в течение суток, а также температуры на наружной и внутренней поверхности стены.

На рис. 6.4 приведен общий вид экспериментальной установки (фото) и схема установки датчиков температур и теплового потока на наружных поверхностях ограждения здания.

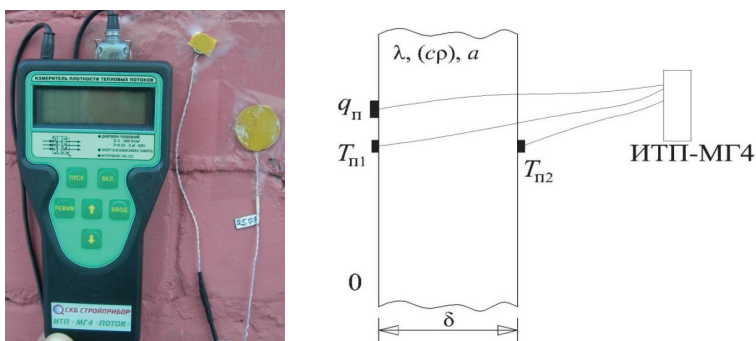


Рис. 6.4 Общий вид экспериментальной установки и схема установки датчиков температур и теплового потока на наружных поверхностях ограждения здания для определения ТЗФС

$T_{п1}$  — температура на наружной поверхности ограждения здания;

$T_{п2}$  — температура на внутренней поверхности ограждения здания;

$q_{п}$  — удельный тепловой поток;  $\delta$  — толщина стены ограждения здания;

ИТП-МГ4 — измеритель тепловых потоков.

Методика комплексного определения ТЗФС ограждений зданий, по тепловым и температурным измерениям на поверхности ограждения здания в течение одного опыта методом неразрушающего контроля, имеет значительное преимущество по сравнению с известными методами и способами ранее.

Преимущество нового способа именно в отсутствии необходимости:

— создавать нагрев или охлаждение материала ограждения здания для проведения эксперимента;

— измерения в процессе эксперимента таких физических параметров, как коэффициент теплообмена, степень черноты, мощности нагревателя;

— создания чисто конвективной или чисто лучистой окружающей среды, что значительно упрощает экспериментальные установки;

— учета потерь теплоты за счет теплообмена с окружающей средой и контактным сопротивлением между образцом и нагревателем.

Необходимо отметить, что все измерения температур производятся на поверхности ограждения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик материалов ограждений зданий.

Эти преимущества значительно упрощают условия проведения эксперимента и повышают метрологический уровень результатов измерения.

Кроме прочего, способ неразрушающего контроля комплекса ТЗФС ограждений зданий, позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, легко реализуется на базе микропроцессорной техники, так как все графические построения и математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ. Поэтому новый и простой способ является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТЗФС материалов, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

Методика экспериментального определения ТЗФС ограждений методом неразрушающего контроля, основанная на измерении температур на наружной и внутренней поверхности здания и измерении плотности теплового потока на наружной поверхности, позволяет определять весь комплекс тепло-акустических свойств материала ограждения здания:

- теплопроводность  $\lambda$ ;
- термическое сопротивление теплопроводности  $R_{СТ}$ ;
- коэффициент теплоусвоения  $B$ ;
- волновое температурное число стенки ограждения  $k_T^{СТ}$ ;
- температуропроводность  $a$ ;
- объемная ( $c_p$ ) и массовая (весовая) теплоемкость  $c$ ;

- тепловая инерция  $b$  и тепловая активность  $b_*$ ;
- термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  и теплопроводность  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$ ;
- поверхностная  $\rho_{\text{П}}$  и удельная плотность ограждения  $\rho$ ;
- звуковая (акустическая) скорость  $C_{\text{А}}$ ;
- модуль упругости Юнга  $E_p$ .

Методика сводится к последовательному выполнению операций: вначале предварительной подготовке и сбора информации, а затем по результатам эксперимента расчет ТЗФС исследуемого материала ограждения здания.

Предварительная подготовка и сбор информации включает установку датчиков температур и теплового потока, согласно рис. 6.4 и замер расстояния  $\delta$  между датчиками температур на поверхности ограждения здания.

Измеритель тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» замеряет плотность теплового потока в течение суток. Логистикой выявляется максимальная плотность теплового потока  $q_{\text{П}}^{\text{max}}$  на наружной поверхности ограждения здания в течении суток и только для этого периода времени определяется разность температур между внутренней  $T_{\text{П1}}$  и наружной  $T_{\text{П2}}$  поверхностью стены ограждения здания.

Замеры соответствующих показателей ограждения здания.

1. Толщина однородной стены ограждения здания:  $\delta_{\text{СТ}}$ , м.
2. Полный период колебания температурной волны:  $z = 24 \text{ ч.} = 86400 \text{ с.}$
3. Максимальная плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания:  $q_{\text{П1}}^{\text{max}}$ , Вт/м<sup>2</sup>.
4. Минимальная плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания:  $q_{\text{П1}}^{\text{min}}$ , Вт/м<sup>2</sup>.
5. При максимальной плотности теплового потока  $q_{\text{П1}}^{\text{max}}$ :
  - температура наружной поверхности ограждения:  $T_{\text{НАР}} = T_{\text{П1}}$ , °С;
  - температура внутренней поверхности ограждения:  $T_{\text{ВН}} = T_{\text{П2}}$ , °С.
6. Температура на наружной поверхности ограждения здания:
  - максимальная:  $T_{\text{П1}}^{\text{max}}$ , °С;
  - минимальная:  $T_{\text{П1}}^{\text{min}}$ , °С.

Расчеты соответствующих показателей ТЗФС ограждения здания.

1. Перепад (разность) температур внутренней и наружной поверхности при максимальной плотности теплового потока:

$$\Delta T_{\text{СТ}} = T_{\text{ВН}} - T_{\text{НАР}}, \text{ °С.}$$

2. Максимальная амплитуда колебаний температурной волны на наружной поверхности в ограждении здания, согласно (12а):

$$\vartheta_{\text{П1}}^{\text{max}} = 0,5 (T_{\text{П1}}^{\text{max}} - T_{\text{П1}}^{\text{min}}), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. Теплопроводность  $\lambda$ , согласно (13):

$$\lambda = (q_{\text{П1}}^{\text{max}} \cdot \delta_{\text{СТ}}) / \Delta T_{\text{СТ}} = (q_{\text{П1}}^{\text{max}} \cdot \delta_{\text{СТ}}) / (T_{\text{ВН}} - T_{\text{НАР}}), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

4. Термическое сопротивление теплопроводности стенки  $R_{\text{СТ}}$ :

$$R_{\text{СТ}} = \delta / \lambda, \text{ (м}^2 \cdot \text{К)} / \text{Вт}.$$

5. Коэффициент теплоусвоения  $B$ , согласно (47):

$$B = q_{\text{П1}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{П1}}^{\text{max}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Волновое температурное число ограждения  $k_{\text{T}}^{\text{СТ}}$ , согласно (54):

$$k_{\text{T}}^{\text{СТ}} = 0,707 (B/\lambda) \approx 0,71 (B/\lambda), \text{ м}^{-1}.$$

7. Температуропроводность ограждения здания, согласно (21а):

$$a = \pi / [z (k_{\text{T}}^{\text{СТ}})^2] = \pi / [86400 (k_{\text{T}}^{\text{СТ}})^2], \text{ м}^2/\text{с}.$$

8. Объемная теплоемкость ограждения здания, согласно (49 а):

$$(c\rho) = (B^2 \cdot z) / (2\pi \cdot \lambda), \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

9. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$  ограждения связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$a = \lambda / (c\rho), \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); \quad (c\rho) = \lambda / a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

10. Тепловая инерция ограждения здания, согласно (89) или (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c\rho), \text{ или: } b = \lambda^2 / a, \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

11. Тепловая активность ограждения, согласно (90), (90 а) или (90 б):

$$b_* = \sqrt{\lambda \cdot (c\rho)} = \lambda \cdot \sqrt{a} = \sqrt{b}, \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

12. Термоизоляция ограждения, согласно (43):

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_{\text{T}}^{\text{СТ}} \cdot \delta), \text{ дБ}.$$

13. Термопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}}.$$

14. Термическое напряжение на поверхности стены, согласно (65):

$$\psi_{\text{П}}^{\text{СТ}} = 0,5 B, \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

15. Поверхностная плотность стены ограждения, согласно (70):

$$\rho_{\Pi} = 50 R_{\text{ТЕРМ}}, \text{ кг/м}^2.$$

16. Удельная плотность ограждения  $\rho$ , согласно (67):

$$\rho = \rho_{\Pi}/\delta, \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

17. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho)/\rho, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

18. Поверхностная скорость температурной волны, согласно (73):

$$S_{\Pi} = a/\delta, \text{ м/с}.$$

19. Плотность тепловой энергии стены ограждения  $\mathcal{E}_{\text{СТ}}$ , согласно (78):

$$\mathcal{E}_{\text{СТ}} = (c\rho) \cdot \Delta T_{\text{СТ}}, \text{ Дж/м}^3.$$

20. Поверхностная скорость температурной волны  $S_{\Pi}$ , согласно (82):

$$S_{\Pi} = q_{\Pi}^{\text{max}}/\mathcal{E}_{\text{СТ}}, \text{ м/с}.$$

21. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (77):

$$c = \lambda/(S_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}), \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

22. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{К}}$ , согласно (85):

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{\text{СТ}}).$$

23. Поверхностная скорость температурной волны при  $\delta = 1$  м:

$$S_{\Pi}^* = a/1\text{м}, \text{ (м/с)}.$$

24. Звуковая (акустическая) скорость, согласно (86):

$$C_{\text{А}} = S_{\Pi}^*/\Phi_{\text{К}}, \text{ м/с}.$$

25. Модуль упругости Юнга материала стены, согласно (88):

$$E_{\text{р}} = C_{\text{А}}^2 \cdot \rho, \text{ (Па)}.$$

26. Длина свободного пробега фононов, согласно (88):

$$L_{\text{Ф}} = 3a/C_{\text{А}}, \text{ \AA}.$$

27. Расчеты основных тепло-звукофизических свойств материала ограждения здания, полученных экспериментально, сводятся в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 Основные тепло-звукофизические свойства материала

Параметр	Расчетные значения	Табличные значения
1. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)		
2. Коэффициент теплоусвоения $B$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К);		
3. Объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), кДж/(м <sup>3</sup> ·К)		
4. Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с		
5. Тепловая активность $b_*$ , кДж/(с <sup>0,5</sup> ·м <sup>2</sup> ·К)		
6. Термоизоляция $R_{\text{ТЕРМ}}$ , дБ		
8. Звуковая (акустическая) скорость $C_A$ , м/с		

### 6.3 Определение ТЗФС ограждения здания из силикатного кирпича

Физический эксперимент проводился на ограждении здания из силикатного кирпича: кладка двух кирпичей и силикатной плитки, общей толщиной  $\delta = 0,6$  м. На рис. 6.5 приведены экспериментальные распределения температуры и теплового потока в течение суток, с интервалом в один час.

Замеры соответствующих показателей ограждения здания.

1. Толщина однородной стены ограждения здания:  $\delta_{\text{СТ}} = 0,6$  м.

2. Полный период колебания температурной волны:  $z = 24$  ч. = 86400 с.

3. Максимальная плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания:  $q_{\text{П1}}^{\text{max}} = 33$  Вт/м<sup>2</sup>.

4. Минимальная плотность теплового потока на наружной поверхности ограждения здания:  $q_{\text{П1}}^{\text{min}} = 5$  Вт/м<sup>2</sup>.

5. При максимальной плотности теплового потока  $q_{\text{П1}}^{\text{max}}$ :

— температура наружной поверхности стены:  $T_{\text{НАР}} = T_{\text{П1}} = -4,6$  °С;

— температура внутренней поверхности стены:  $T_{\text{ВН}} = T_{\text{П2}} = +18,4$  °С.

6. Температура на наружной поверхности ограждения здания:

— максимальная:  $T_{\text{П1}}^{\text{max}} = +2,0$  °С (в 14 часов);

— минимальная:  $T_{\text{П1}}^{\text{min}} = -4,6$  °С (в 3 часа).

Расчеты соответствующих показателей ТЗФС ограждения здания.

1. Перепад (разность) температур внутренней и наружной поверхности при максимальной плотности теплового потока:

$$\Delta T_{\text{СТ}} = T_{\text{ВН}} - T_{\text{НАР}} = 18,4 - (-4,6) = 23 \text{ °С.}$$





4. Термическое сопротивление теплопроводности стенки  $R_{СТ}$ :

$$R_{СТ} = \delta/\lambda = 0,6/0,86 = 0,7 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт.}$$

5. Коэффициент теплоусвоения  $B$ , согласно (47):

$$B = q_{\Pi 1}^{max}/\vartheta_{\Pi 1}^{max} = 33/3,3 = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К).}$$

6. Волновое температурное число ограждения  $k_T^{CT}$ , согласно (54):

$$k_T^{CT} = 0,707 (B/\lambda) = 0,707 (10/0,86) = 8,14 \text{ м}^{-1}.$$

7. Температуропроводность ограждения здания, согласно (21а):

$$a = \pi/[z (k_T^{CT})^2] = 3,14/[86400 \cdot (8,14)^2] = 0,548 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с.}$$

8. Объемная теплоемкость ограждения здания, согласно (49 а):

$$(c\rho) = (B^2 \cdot z)/(2\pi \cdot \lambda) = (98 \cdot 86400)/(2 \cdot 3,14 \cdot 0,86) = 1568000 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К).}$$

9. Температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость, согласно (7...9):

$$a = \lambda/(c\rho) = 0,86/1568000 = 0,55 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с.}$$

$$(c\rho) = \lambda/a, = 0,86/0,548 \cdot 10^{-6} = 1569000 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К).}$$

10. Тепловая инерция ограждения здания, согласно (89) или (89 а):

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,86 \cdot 1568000 = 1,348 \cdot 10^6 \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2).$$

11. Тепловая активность ограждения, согласно (90), (90 а) или (90 б):

$$b_* = \sqrt{b} = \sqrt{1348000} = 1161 \text{ Дж}/(\text{с}^{0,5}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К}).$$

12. Термоизоляция ограждения, согласно (43):

$$R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{CT} \cdot \delta) = 4,34 \cdot 8,14 \cdot 0,6 = 21,2 \text{ дБ.}$$

13. Термопроводность, согласно (42):

$$\alpha_{\text{ТЕРМ}} = 10^{-0,1R_{\text{ТЕРМ}}} = 10^{-0,1(21,2)} = 1/10^{2,1} = 1/126 = 0,008.$$

14. Термическое напряжение на поверхности стены, согласно (65):

$$\psi_{\Pi}^{CT} = 0,5 B = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ (Па} \cdot \text{м)},$$

или согласно (66):

$$\psi_{\Pi}^{CT} = 4/R_{СТ} = 4/0,7 = 5,7 \text{ (Па} \cdot \text{м).}$$

15. Поверхностная плотность стены ограждения, согласно (70):

$$\rho_{\Pi} = 50 R_{\text{ТЕРМ}} = 50 \cdot 21,2 = 1060 \text{ кг/м}^2.$$

16. Удельная плотность ограждения  $\rho$ , согласно (67):

$$\rho = \rho_{\Pi} / \delta = 1060 / 0,6 = 1767 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

17. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (9):

$$c = (c\rho) / \rho = 1569000 / 1767 = 888 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

18. Поверхностная скорость температурной волны, согласно (73):

$$S_{\Pi} = a / \delta = 0,55 \cdot 10^{-6} / 0,6 = 0,916 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}.$$

19. Плотность тепловой энергии стены ограждения  $\mathcal{E}_{\text{СТ}}$ , согласно (78):

$$\mathcal{E}_{\text{СТ}} = (c\rho) \cdot \Delta T_{\text{СТ}} = 1568000 \cdot 23 = 36064000 \text{ Дж/м}^3.$$

20. Поверхностная скорость температурной волны  $S_{\Pi}$ , согласно (82):

$$S_{\Pi} = q_{\Pi}^{\text{max}} / \mathcal{E}_{\text{СТ}} = 33 / 36064000 = 0,915 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}.$$

21. Массовая (весовая) теплоемкость, согласно (77):

$$c = \lambda / (S_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}) = 0,86 / (0,916 \cdot 1060) = 886 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

22. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{К}}$  (число Фокина), согласно (85):

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \psi_{\Pi}^{\text{СТ}}) = (0,916 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (1060 / 5) = 0,158 \cdot 10^{-9}.$$

23. Поверхностная скорость температурной волны при  $\delta = 1 \text{ м}$ :

$$S_{\Pi}^* = a / 1\text{м} = 0,55 \cdot 10^{-6} / 1 = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ (м/с)}.$$

24. Звуковая (акустическая) скорость, согласно (86):

$$C_{\text{А}} = S_{\Pi}^* / \Phi_{\text{К}} = 0,55 \cdot 10^{-6} / 0,158 \cdot 10^{-9} = 3481 \text{ м/с}.$$

Согласно табличным данным [2], для силикатного кирпича скорость звука составляет  $C_{\text{А}} = 3400 \text{ м/с}$ ; по другим источникам  $C_{\text{А}} = 3600 \text{ м/с}$ . То есть расхождение по скорости звука составляет 3...5 %.

25. Модуль упругости Юнга материала стены, согласно (88):

$$E_{\text{р}} = C_{\text{А}}^2 \cdot \rho = (3481)^2 \cdot 1767 = 21,4 \cdot 10^9 \text{ Па} = 21,4 \text{ (ГПа)}.$$

Согласно табличным данным [82, 83], модуль упругости Юнга материала стены из кладки силикатного кирпича  $E_p = 21,4$  ГПа, соответствует пределу прочности при сжатии силикатного кирпича марки: 200.

26. Длина свободного пробега фононов, согласно фононной теории теплопроводности [17] и согласно (88):

$$L_\phi = 3a/C_A = 3(0,55 \cdot 10^{-6})/3481 = 4,7 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 4,7 \text{ \AA}.$$

Согласно табличным данным [17], длина свободного пробега фононов материала стены из кладки силикатного кирпича составляет порядка 4...15  $\text{\AA}$ .

27. Расчеты основных тепло-звукофизических свойств материала ограждения здания стены из кладки силикатного кирпича, полученных экспериментально, сводятся в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 Основные тепло-звукофизические свойства стены здания из кладки силикатного кирпича:  $\rho = 1767$  (кг/м<sup>3</sup>),  $\delta = 0,6$  м.

Параметр	Расчетные значения	Табличные значения
1. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,86	0,7...0,9
2. Коэффициент теплоусвоения $B$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К);	10	—
3. Объемная теплоемкость ( $c_p$ ), кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	1,569	1,5...1,7
4. Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	0,55	0,45...0,6
5. Тепловая активность $b_*$ , кДж/(с <sup>0,5</sup> ·м <sup>2</sup> ·К)	1,161	—
6. Удельная плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1767	1500...1900
7. Термоизоляция $R_{\text{ТЕРМ}}$ , дБ	21,2	—
8. Звуковая (акустическая) скорость $C_A$ , м/с	3481	3400...3600

## 6.4 Выводы по главе 6

1. Предлагаемая тепло-звуковая аналогия, способ определения ТЗФС ограждений зданий методом неразрушающего контроля, по тепловым измерениям на поверхности, позволяет достаточно точно, просто и надежно определить весь комплекс ТЗФС ограждения здания из силикатного кирпича.

2. Полученные значения ТЗФС ограждения здания из силикатного кирпича согласуются со справочными (литературными) значениями этих коэффициентов. Расхождение рассчитанных значений со справочными не превышает 5 %.

3. Тепло-звуковая аналогия позволяет определять по температурным и тепловым измерениям на поверхности ограждения здания, методом неразрушающего контроля: теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, теплоусвоение, удельную плотность, скорость звука в твердых телах и материалах, длину свободного пробега фононов, модуль упругости Юнга.

4. Все измерения температур и тепловых потоков производятся на поверхности ограждения без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик материалов ограждений зданий. Новый и простой способ является перспективным для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТЗФС материалов, в строительной теплотехнике и различных отраслях народного хозяйства.

## ГЛАВА 7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО-ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ОТРАЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЛНЫ

### 7.1 Особенности отражения температурной волны

Если плоская температурная волна, в процессе прохождения в твердом теле, пластине, ограждении здания, встречает какое-либо препятствие (теплоизолятор), то происходит *отражение* температурной волны. Эффективность отражения температурной волны зависит от степени различия термических сопротивлений обеих сред (материалов). Отражение температурной волны возможно, когда сопротивление отражающей среды или материала препятствия, больше сопротивления первичной (исследуемого образца).

Эффективность отражения температурной волны выше, когда ниже термopроводность  $\alpha_{\text{ТЕРМ}}$  и выше термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  материала препятствия. Согласно гл. 3.4, для отражения температурной волны, термоизоляция материала препятствия (теплоизолятора) будет более эффективна при большей толщине  $\delta$  и меньшим коэффициентом температуропроводности  $a$ .

Ранее в гл. 5.1 приведено устройство и работа измерителя тепло-звукофизических свойств материалов (FOKUS) на образце в виде пластины с использованием холодильника, который обеспечивает высокую плотность теплового потока через образец. Если же в такой установке, вместо холодильника использовать обычный теплоизоляционный материал (теплоизолятор), то от него происходит *отражение* температурной волны обратно в образец. Общий вид такой модульной установки FOKUS-M приведен на рис. 7.1.

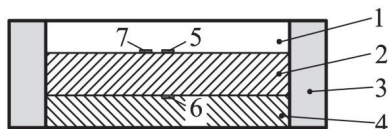


Рис. 7.1 Схема экспериментальной установки FOKUS-M с теплоизолятором, для определения ТЗФС в пластине

- 1 – нагреватель; 2 – исследуемый образец — пластина;
- 3 – торцевой защитный кожух; 4 – теплоизолятор;
- 5 – датчик температур на поверхности образца с стороны нагревателя;
- 6 – датчик температур поверхности образца с стороны теплоизолятора;
- 7 – датчик теплового потока на поверхности образца от нагревателя

В результате отражения температурной волны от теплоизолятора, в исследуемом материале (твёрдом теле) получается накладка температурной волны и сдвиг фаз, что приводит (при одинаковой доле проникновения температурной волны, например:  $\theta = 0,25$ ), к сокращению времени проведения физического эксперимента и повышению эффективности устройства по определению ТЗФС. Время сдвига фаз температурной волны ( $\tau_{M1}$  и  $\tau_{M2}$ ) зависит от ТФС исследуемого материала и теплоизолятора.

При отражении температурной волны в исследуемом материале возможна также и пучность теплового потока, что приводит к образованию максимальной плотности теплового потока на поверхности со стороны нагрева.

Общий вид распределения по времени температур на одной поверхности образца со стороны нагревателя  $T_{П1}$  и с другой, со стороны теплоизолятора  $T_{П2}$ , а также плотности теплового потока  $q_{П}$  со стороны нагревателя, в модульной установке FOKUS-M, приведён на рис. 7.2.

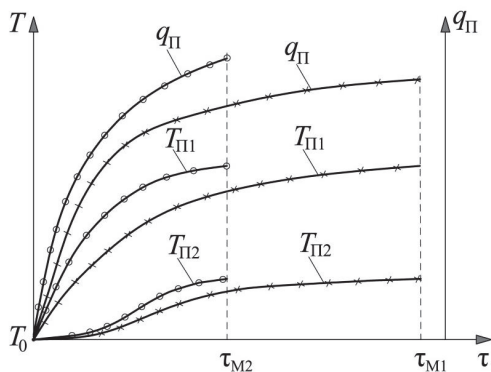


Рис. 7.2 Распределение температур  $T$  по времени  $\tau$  в образце (пластине) без теплоизоляции при прохождении температурной волны (—×—×—×—×—) и с теплоизоляцией при отражении температурной волны (—○—○—○—○—)

$T_0$  — начальная температура образца и экспериментальной установки;

$T_{П1}$  — температура поверхности образца со стороны нагревателя;

$T_{П2}$  — температура поверхности образца со стороны теплоизолятора;

$q_{П}$  — плотность теплового потока со стороны нагревателя;

$\tau_{M1}$ ,  $\tau_{M2}$  — время сдвига фаз температурной волны, при котором доля проникновения температурной волны:  $\theta = 0,243 \dots 0,25$

Авторами разработаны две конструкции экспериментальной установки в зависимости от граничных условий нагрева и охлаждения.

Конструкция устройства Fokus-M и его работа отличается от устройств FOKUS (патент РФ № 2767468 и патент РФ № 2788562), только тем, что в установке между образцом и холодильником установлен теплоизолятор.

В устройстве Fokus-M, со стороны нагревателя создаются граничные условия 1 рода (задано распределение температуры на поверхности тела), а со стороны теплоизолятора — граничные условия 4 рода (условия сопряжения — характеризуют процессы теплопроводности между соприкасающимися поверхностями различных тел, когда температура в точке сопряжения тел одинакова, но тепловые потоки разные).

В процессе эксперимента, тепловой поток на поверхности пластины со стороны нагревателя начинает возрастать, соответственно повышается температура образца, а во время фиксирования доли проникновения температурной волны ( $\theta_T = 0,243 \dots 0,25$ ), выявляется плотность теплового потока, температура поверхности образца со стороны нагревателя  $T_{П1}$ , температура поверхности образца со стороны теплоизолятора  $T_{П2}$  и время наступления упорядоченного теплового режима  $\tau_p$ . Затем, по методике VM (см. ниже), производится расчёт комплекса теплофизических и звукофизических свойств, а именно: теплопроводность, коэффициент теплоусвоения, объемная теплоемкость, температуропроводность, тепловая инерция, термическое сопротивление, термоизоляция, скорость звука, модуль Юнга и др.

Авторами также сконструирована установка Fokus-1, которая позволяет определять ТЗФС при максимальном значении плотности теплового потока  $q_{П}^{max}$  на поверхности пластины со стороны нагревателя, что позволяет значительно (в два, три раза) сократить время проведения эксперимента. Сущность разработанного способа состоит в том, что со стороны нагрева пластины создаются граничные условия 2 рода (задано распределение теплового потока на поверхности тела), а со стороны теплоизолятора граничные условия 4 рода (условия сопряжения). Теплоизолятор снаружи охлаждается окружающей средой при естественной конвекции воздуха или граничных условиях 3 рода (задана температура окружающей среды и закон теплообмена между средой и поверхностью тела).

Установлено, что при несимметричном нагреве пластины и отражении температурной волны, упорядоченный тепловой режим наступает с погрешностью в 1 %, в установке Fokus-M при доле проникновения температурной волны:  $\theta_T = 0,243 \dots 0,25$  (34 в), а в установке Fokus-1, при  $q_{П}^{max}$ .

Авторами были проведены серии экспериментальных исследований ТЗФС различных материалов (оргстекло, фторопласт, текстолит и др.) нестандартным методом, с помощью устройства Fokus-M и Fokus-1.

## 7.2 Устройство и работа измерителя тепло-звукофизических свойств материалов Fokus-M нестационарным методом

Способ определения комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов Fokus-M основан на устройстве, которое подтверждено патентом на изобретение РФ № № 2788562 (опубл. 23.01.2023).

Сущность разработанного способа экспериментального определения комплекса тепло-звукофизических свойств твердых строительных материалов, на образцах в виде пластины, нестационарным методом тепло-звуковой аналогии, а также устройство для его осуществления состоит в следующем. Исследуемый образец в форме пластины с размерами  $250 \times 250 \times (5 \dots 50)$  мм помещают в устройство, схема которого приведена на рис. 7.3.

Конструкция устройства Fokus-M и его работа отличается от устройств FOKUS (разд. 5.1 и патент РФ № 2788562), только тем, что в установке между образцом и холодильником установлен теплоизолятор.

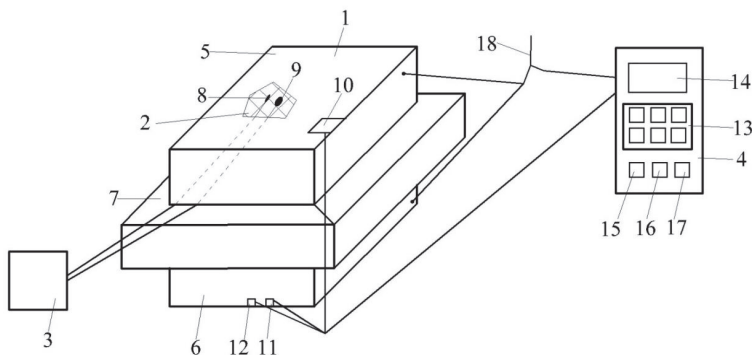


Рис. 7.3 Устройство Fokus-M для экспериментального определения тепло-звукофизических свойств материалов на образце в виде пластины методом тепло-звуковой аналогии

- 1 — установка; 2 — исследуемый образец; 3 — ЭВМ; 4 — электронный блок управления; 5 — плоский нагреватель; 6 — теплоизолятор;  
7 — боковой теплоизолятор; 8 — датчик температуры;  
9 — датчик теплового потока на образце со стороны нагревателя;  
10 — термопара нагревателя; 11 — термопара теплоизолятора;  
12 — датчик теплового потока со стороны теплоизолятора;  
13 — пульт управления на кнопках; 14 — дисплей; 15 — блок памяти;  
16 — таймер; 17 — вычислительное устройство; 18 — электрическая сеть



### 7.3 Методика VM экспериментального определения ТЗФС материалов в установке Fokus-M и Fokus-1

Методика экспериментального определения тепло-звукофизических свойств твердых материалов и изделий на образцах — пластинах сводится к последовательному выполнению следующих операций или действий: вначале предварительной подготовке и сбора информации, а затем по результатам эксперимента расчет параметров ТЗФС исследуемого материала.

1. Используется готовое изделие или изготавливается образец — пластина размером  $250 \times 250 \times 5 \dots 50$  мм. Изделие (пластина) взвешивается на весах и замеряется его масса  $m$  (кг), измеряется толщина пластины  $\delta$  (м), а линейные размеры соответственно равны:  $0,25 \times 0,25 \times \delta$  м. По линейным размерам и толщине пластины (образца) вычисляется: объем изделия  $V$  ( $\text{м}^3$ ), удельная плотность материала  $\rho = m/V$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), а также поверхностная плотность пластины, которая согласно (67):  $\rho_{\text{п}} = \rho \cdot \delta$ , ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ).

2. Образец — пластина устанавливается в устройство Fokus-M или Fokus-1 и фиксируется с торцов изоляцией для снижения потерь теплоты.

3. Вводятся и устанавливаются необходимые для эксперимента параметры: температура или мощность нагревателя и толщина пластины  $\delta$ . Затем включается устройство и проводится запись соответствующих параметров.

4. В процессе эксперимента для образца — пластины полученные параметры фиксируются на дисплее прибора, а именно:

$\delta$  — толщина пластины, м;

$T_0$  — начальная температура образца — пластины,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{п1}}$  — температура поверхности пластины со стороны нагрева,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{п2}}$  — температура поверхности пластины со стороны изолятора,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$q_{\text{п}}$  — плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагревателя, при доле проникновения температурной волны  $\theta = 0,25$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$\tau_{\text{в}}$  — время, достижения плотности теплового потока на поверхности пластины, с, при доле проникновения температурной волны  $\theta = 0,25$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$q_{\text{п}}^{\text{max}}$  — максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагревателя,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  (Fokus-1);

$\tau_{\text{р}}$  — время, при котором достигается максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины, с.

В установке Fokus-M, при доле проникновения температурной волны:  $\theta_{\text{T}} = 0,243 \dots 0,25$  и отсчета времени ( $\tau_{\text{в}}$ ), согласно разд. (3.2), безразмерное волновое температурное число  $H_{\text{T}} = 1,414$  (при доле проникновения температурной волны  $\theta_{\text{T}} = 0,243$ );  $H_{\text{T}} = 1,39$  (при  $\theta_{\text{T}} = 0,25$ );  $H_{\text{T}} = 1,4$  (при  $\theta_{\text{T}} = 0,247$ ).

В установке Fokus-M, волновое температурное число в пластине, за счет отражения температурной волны, составит:

$$k_T^{из} = 2H/\delta = 2 \lg(1/\theta_T)/(0,434 \cdot \delta), \text{ м}^{-1}.$$

В установке Fokus-1, при максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины со стороны нагревателя  $q_{\Pi}^{max}$  и отсчета времени ( $\tau_r$ ), расчет волнового температурного числа  $k_T^{из}$  проводится только по температурам пластины на ее поверхностях: со стороны нагревателя и теплоизолятора. Согласно методике (разд. 3.2), для отсчета времени ( $\tau_r$ ) и замеренным значениям температур ( $T_0, T_{\Pi 1}, T_{\Pi 2}$ ), вначале согласно (25а), определяется доля проникновения температурной волны  $\theta_T$ , безразмерное волновое число  $H$ , а затем волновое число в пластине  $k_T^{из}$ , согласно (29):

$$\theta_T = (T_{\Pi 2} - T_0)/(T_{\Pi 1} - T_0) = \vartheta_{\Pi 2}/\vartheta_{\Pi 1}.$$

$$H = \lg(1/\theta_T)/(\lg e) = \lg(1/\theta_T)/(0,434).$$

$$k_T^{из} = H/\delta = \lg(1/\theta_T)/(0,434 \cdot \delta).$$

Расчеты ТФС в установке Fokus-M и Fokus-1 приведены в табл. 7.1, а основные звукофизические свойства (ТЗФС) вычисляются для стадии упорядоченного теплового режима, по следующей методике.

1. Поверхностная скорость температурной волны, согласно (73):

$$S_{\Pi} = a/\delta, \text{ м/с}.$$

$S_{\Pi}^*$  — скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1\text{ м}$ , численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{ м}$ , м/с.

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}$  больше  $S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^*$ .

2. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{пл}$ , согласно (63), обратно пропорционально половине термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{пл}$ :

$$\psi_{\Pi}^{пл} = 2/R_{пл} = 1/0,5 R_{пл}, (\text{Па} \cdot \text{м}).$$

3. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K$ , согласно (85):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{пл}).$$

4. Звуковая (акустическая) скорость, согласно (86):

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K, \text{ м/с}.$$

5. Модуль упругости Юнга, согласно (88):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho, (\text{Па}).$$

Таблица 7.1 Расчетные формулы для определения теплофизических свойств (ТФС) материала — пластины при отражении температурной волны с использованием теплоизолятора в установке: Fokus-M и Fokus-1

Установка Fokus-M,	Установка Fokus-1,
доля проникновения температурной волны: $\theta_T = 0,243 \dots 0,25$ и $(\tau_B)$	максимальная плотность теплового потока: $q_{II}^{max}$ и $(\tau_P)$
Доля проникновения температурной волны	
$\theta_T = (T_{П2} - T_0)/(T_{П1} - T_0)$	$\theta_T = (T_{П2} - T_0)/(T_{П1} - T_0)$
Волновое температурное число в пластине, $m^{-1}$	
$k_T^{H3} = 2H/\delta = 2 \lg(1/\theta_T)/(0,434 \cdot \delta)$	$k_T^{H3} = H/\delta = \lg(1/\theta_T)/(0,434 \cdot \delta)$
Амплитуда колебаний температурной волны на поверхности пластины, $^{\circ}C$	
$\theta_{II} = 0,5 (T_{П1} - T_0)$	$\theta_{II}^{max} = 0,5 (T_{П1} - T_0)$
Коэффициент теплоусвоения, $Вт/(м^2 \cdot К)$	
$B_B = q_{II}/\theta_{II}$	$B_P = q_{II}^{max}/\theta_{II}^{max}$
Теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$	
$\lambda = B_B/1,414 (2 \cdot k_T^{H3}); \lambda = 0,25(B_B \cdot \delta)$	$\lambda = B_P/1,414 (k_T^{H3})$
Термическое сопротивление теплопроводности пластины, $(м^2 \cdot К)/Вт$	
$R_{Пл} = \delta/\lambda$	$R_{Пл} = \delta/\lambda$
Объемная теплоемкость, $Дж/(м^3 \cdot К)$	
$(cp) = (B_B)^2 \cdot (\tau_B)/(2\pi \cdot \lambda)$	$(cp) = (B_P)^2 \cdot (\tau_P)/(\pi \cdot \lambda)$
Температуропроводность, $м^2/с$	
$a = \pi/[\tau_B (k_T^{H3})^2]$	$a = \pi/[2\tau_P (k_T^{H3})^2]$
Число Фурье: $Fo = (a \cdot \tau_B)/\delta^2$	Массовая теплоемкость: $c = (cp)/\rho$
Тепловая инерция: $b = \lambda \cdot (cp)$ , или $b = \lambda^2/a$ , $Дж^2/(с \cdot м^4 \cdot К^2)$	
Термоизоляция, при $(\tau_B)$ : $R_{ТЕРМ} = 4,34 (k_T^{H3} \cdot \delta)$ , дБ	

#### 7.4 Теплофизический эксперимент пластины из текстолита

Физический эксперимент проводился на установке Fokus-M (разд. 7.3).

1. Использовалась пластина из текстолита размером  $250 \times 250 \times 12$  мм.

Толщина пластины:  $\delta = 0,012$  м. Масса пластины  $m = 1,01$  (кг).

Объем пластины  $V = 0,25 \times 0,25 \times 0,012 = 0,000755$   $м^3$ .

Удельная плотность пластины:  $\rho = m/V = 1,01/0,000755 = 1338$  (кг/ $м^3$ ).

Поверхностная плотность:  $\rho_{II} = \rho \cdot \delta = 1338 \cdot 0,012 = 16$  (кг/ $м^2$ ).

2. В процессе и после завершения эксперимента, полученные параметры для пластины фиксируются на дисплее прибора, а именно:

$T_0 = 21,6$   $^{\circ}C$  — начальная температура пластины;

$T_{П1} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$  — температура на поверхности пластины со стороны нагревателя, при доле проникновения температурной волны  $\theta = 0,25$ ;

$T_{П2} = 22,7 \text{ }^\circ\text{C}$  — температура на поверхности пластины со стороны теплоизолятора, при доле проникновения температурной волны  $\theta = 0,25$ ;

$q_{П} = 189 \text{ Вт/м}^2$  — плотность теплового потока на поверхности пластины, при доле проникновения температурной волны  $\theta = 0,25$ ;

$\tau_{\text{в}} = 400 \text{ с}$  — время, при котором достигается доля проникновения температурной волны  $\theta = 0,25$ .

Время при  $\theta = 0,25$  в установке FOKUS (разд. 5.3.3):  $\tau_{\text{р}} = 90 \text{ мин}$ .

На рис. 7.4 приведено экспериментальное распределение температур и теплового потока на поверхности образца — пластины из текстолита.

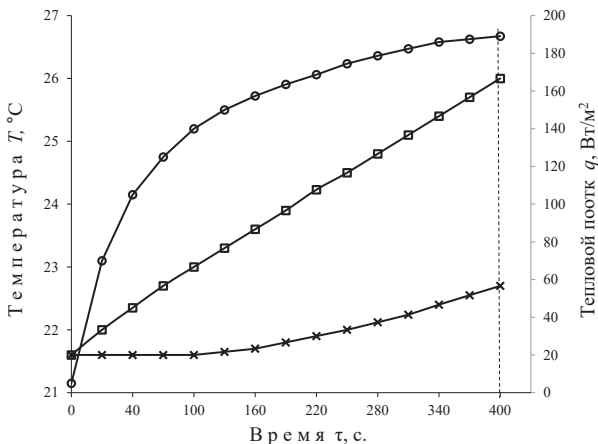


Рис. 7.4 Распределение температур  $T_{П1}$  ( $-\square-\square-$ ),  $T_{П2}$  ( $-x-x-$ ) и плотности теплового потока  $q_{П}$  ( $-o-o-$ ) по времени  $\tau$  в пластине из текстолита  
*Расчет ТФС текстолита.*

Для упорядоченного теплового режима в пластине, то есть при  $\tau_{\text{в}}$  и  $q_{\text{П}}$ , определяются следующие параметры.

1. Доля проникновения температурной волны  $\theta_{\text{T}}$  для отсчета времени ( $\tau_{\text{р}}$ ) и замеренным значениям температур  $T_0$ ,  $T_{П1}$ ,  $T_{П2}$ :

$$\theta_{\text{T}} = (T_{П2} - T_0)/(T_{П1} - T_0) = (22,7 - 21,6)/(26 - 21,6) = 1,1/4,4 = 0,25.$$

2. Безразмерное волновое число  $H$ :

$$H = \lg(1/\theta_{\text{T}})/(0,434) = \lg(1/0,25)/(0,434) = 0,602/0,434 = 1,387.$$

3. Волновое температурное число в пластине при  $\tau_{\text{в}}$  и  $q_{\text{П}}$ :

$$k_{\text{T}}^{\text{пл}} = 2H/\delta = 2 \cdot 1,387/0,012 = 231.$$

4. Амплитуда колебаний при отражении температурной волны:

$$\vartheta_{\Pi} = 0,5 (T_{\Pi 1} - T_0) = 0,5 (26 - 21,6) = 0,5 \cdot 4,4 = 2,2.$$

5. Коэффициент теплоусвоения:

$$B_B = q_{\Pi} / \vartheta_{\Pi} = 189 / 2,2 = 85,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Теплопроводность:

$$\lambda = B_B / 1,414 (k_T^{\text{н3}}) = 85,9 / 1,414 (231) = 0,263 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

$$\lambda = 0,25(B_B \cdot \delta) = 0,25(85,9 \cdot 0,012) = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

7. Термическое сопротивление теплопроводности пластины:

$$R_{\Pi\lambda} = \delta / \lambda = 0,012 / 0,263 = 0,0456 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

8. Объемная теплоемкость:

$$(c\rho) = (B_B)^2 \cdot (\tau_B) / (2\pi \cdot \lambda) = (85,9)^2 \cdot 400 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,263) = 1787 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

9. Температуропроводность:

$$a = \pi / \tau_B \cdot (k_T^{\text{н3}})^2 = 3,14 / [4 \cdot 400 \cdot (231)^2] = 0,147 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:

$$Fo = (a \cdot \tau_B) / \delta^2 = (400 \cdot 0,147 \cdot 10^{-6}) / (0,012)^2 = 0,4.$$

11. Тепловая инерция:

$$b = \lambda \cdot (c\rho) = 0,263 \cdot 1787000 = 470000 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

12. Термоизоляция:  $R_{\text{ТЕРМ}} = 4,34 (k_T^{\text{н3}} \cdot \delta) = 4,34 (231 \cdot 0,012) = 12,04 \text{ дБ}.$

*Расчет ТЗФС текстолита.*

Основные тепло-звукофизические свойства (ТЗФС) материалов, вычисляются для стадии упорядоченного теплового режима (при  $\tau_B$ ).

1. Поверхностная скорость температурной волны:

$$S_{\Pi} = a / \delta = (0,147 \cdot 10^{-6}) / 0,012 = 12,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}.$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a / 1\text{м} = 0,147 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}.$  Скорость температурной волны  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi} / S_{\Pi}^* = 12,25 / 0,147 = 83.$

2. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}:$

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = 2 / R_{\Pi\lambda} = 2 / 0,0456 = 43,9 (\text{Па} \cdot \text{м}).$$

3. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K:$

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \psi_{\Pi}^{пл}) = (12,25 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 16 / 43,9 = 54,7 \cdot 10^{-12}.$$

4. Звуковая (акустическая) скорость:

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_K = (0,147 \cdot 10^{-6}) / (54,7 \cdot 10^{-12}) = 2687 \text{ м/с}.$$

5. Модуль упругости Юнга, согласно (88):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (2687)^2 \cdot 1338 = 9,59 \cdot 10^9 \text{ Па} = 9,66 \text{ ГПа}.$$

Основные свойства (ТЗФС) текстолита, полученные экспериментально при двух тепловых режимах:  $q_{\Pi}^*$  (табл. 5.3) и  $q_{\Pi}$ , приведены в табл. 7.2.

Т а б л и ц а 7.2 Основные свойства (ТЗФС) текстолита при  $\theta_T = 0,243$

Параметр	Режим при $q_{\Pi}^*$ и $\tau_*$	Режим при $q_{\Pi}$ и $\tau_B$	Табличные значения
1. Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	0,26	0,263	0,23...0,28
2. Объемная теплоемкость ( $c_p$ ), кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	1790	1787	1700...1900
3. Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	0,145	0,147	0,13...0,16
4. Тепловая инерция, Дж <sup>2</sup> /(с·м <sup>4</sup> ·К <sup>2</sup> )	464000	470000	—
5. Термоизоляция, $R_{\text{ТЕРМ}}$ , дБ	6,14	12,04	—
6. Скорость звука, м/с	2675	2687	2500...2900
7. Модуль упругости Юнга, ГПа	9,59	9,66	6...10

Резюме.

1. Приведены результаты физического эксперимента по определению ТЗФС материала текстолита в двух вариантах: режим  $q_{\Pi}^*$  (табл. 5.3) — без теплоизоляции (при наличии нагревателя и холодильника на поверхностях пластины), при интенсивном прохождении температурной волны через образец, а также режим  $q_{\Pi}$  — при отражении температурной волны (при наличии на поверхности пластины нагревателя и теплоизолятора, вместо холодильника). Результаты физического эксперимента показывают высокую сходимость, а также соответствие табличным (справочным) значениям (табл. 7.2).

2. Значения термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$  для двух рассматриваемых режимов разные, ввиду: 1) разной толщиной пластины:  $\delta = 12$  мм, с теплоизолятором и  $\delta = 20$  мм, без теплоизолятора; 2) разного значения волнового температурного числа:  $(k_T^{\text{из}} = 321) > (k_T^{\text{пл}} = 70,7)$ , хотя доля проникновения температурной

волны в обоих случаях одинакова:  $\theta_T = 0,243$ . Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  текстолита толщиной  $\delta = 0,012\text{м}$  с теплоизолятором выше, а значит и более эффективна, чем термоизоляция текстолита с  $\delta = 0,02\text{м}$ , но без теплоизолятора.

Особо важно, что из всех (примерно одинаковых) ТЗФС и одинаковой доле проникновения температурной волны:  $\theta_T = 0,243$ , только термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (дБ) имеет различия и тем самым характеризует степень энергетической эффективности материала (пластины). Это являются перспективными в технической теплофизике, обладает новизной и оригинальностью и выгодно отличается от известных методов.

3. При прохождении температурной волны через текстолит  $\delta = 0,02\text{м}$  (режим  $q_{\Pi}^*$ , табл. 5.3), поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  выше скорости температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (на глубине 1 м) в  $n$  раз:

$$n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 7,25/0,145 = 50.$$

При отражении температурной волны в текстолите  $\delta = 0,012\text{м}$  (режим  $q_{\Pi}$ ), поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  больше скорости температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (на глубине 1 м) в  $n$  раз, а именно:

$$n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 12,25/0,147 = 83.$$

Это показывает, что при одинаковой теплопроводности материала, поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  больше у текстолита с меньшей толщиной  $\delta = 0,012\text{м}$  и с теплоизолятором, и наоборот.

4. Время достижения  $\theta = 0,25$  в установке FOKUS (разд. 5.3.3) составляет:  $\tau_p = 5400$  с, а в установке Fokus-M меньше:  $\tau_{B1} = 400$  с (в 13,5 раз).

5. Число Фурье, ввиду сокращения времени достижения упорядоченного теплового режима, при  $\tau_B$  и  $q_{\Pi}$ , составляет:  $Fo = 0,4$  (а при  $q_{\Pi}^*$ :  $Fo = 0,8$ ).

## 7.5 Теплофизический эксперимент пластины из оргстекла

Экспериментальное исследование проводилось на установке Fokus-1, которая позволяет определять ТЗФС при максимальном значении плотности теплового потока  $q_{\Pi}^{max}$  на поверхности пластины со стороны нагревателя.

Физический эксперимент проводился согласно разд. 7.3.

1. Использовалась пластина из оргстекла размером  $250 \times 250 \times 28,4$  мм.

Толщина пластины:  $\delta = 0,0284$  м. Масса пластины  $m = 2,1$  (кг).

Объем пластины  $V = 0,25 \times 0,25 \times 0,0284 = 0,001775$  м<sup>3</sup>.

Удельная плотность пластины:  $\rho = m/V = 2,1/0,001775 = 1183$  (кг/м<sup>3</sup>).

Поверхностная плотность:  $\rho_{\Pi} = \rho \cdot \delta = 1183 \cdot 0,0284 = 33,6$  (кг/м<sup>2</sup>).

$T_0 = 21,7$  °С — начальная температура пластины;

$T_{П1} = 27,8 \text{ }^\circ\text{C}$  — температура на поверхности пластины со стороны нагревателя, при максимальной плотности теплового потока;

$T_{П2} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$  — температура на поверхности пластины со стороны теплоизолятора, при  $q_{П}^{max}$ ;

$q_{П}^{max} = 90,1 \text{ Вт/м}^2$  — максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины со стороны нагрева;

$\tau_p = 19 \text{ мин} = 1140 \text{ с}$  — время, при котором достигается максимальная плотность теплового потока на поверхности пластины.

На рис. 7.5 приведено экспериментальное распределение температур и теплового потока на поверхности образца — пластины из оргстекла.

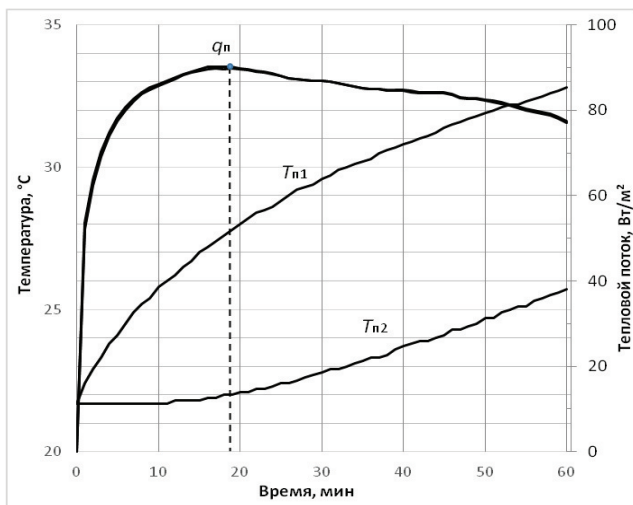


Рис. 7.5 Распределение температур  $T_{П1}$ ,  $T_{П2}$  и плотности теплового потока  $q_{П}$  по времени  $\tau$  в пластине из оргстекла

#### Расчет ТФС оргстекла.

При максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины, то есть при  $q_{П}^{max}$  и  $\tau_p$ , определяются следующие параметры.

1. Доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  для отсчета времени ( $\tau_p$ ) и замеренным значениям температур  $T_0$ ,  $T_{П1}$ ,  $T_{П2}$ :

$$\theta_T = (T_{П2} - T_0) / (T_{П1} - T_0) = (22 - 21,7) / (27,8 - 21,7) = 0,3 / 6,1 = 0,0492.$$

2. Безразмерное волновое число  $H$ :

$$H = \lg(1/\theta_T) / (0,434) = \lg(1/0,0492) / (0,434) = 1,308 / 0,434 = 3,014.$$



3. Волновое температурное число в пластине при  $\tau_B$  и  $q_{II}$ :

$$k_T^{из} = H/\delta = 3,014/0,0284 = 106,12.$$

4. Амплитуда колебаний при отражении температурной волны:

$$\vartheta_{II} = 0,5 (T_{II} - T_0) = 0,5 (27,8 - 21,7) = 0,5 \cdot 6,1 = 3,05.$$

5. Коэффициент теплоусвоения:

$$B_P = q_{II}/\vartheta_{II} = 91,1/3,05 = 29,87 = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

6. Теплопроводность:

$$\lambda = B_P/1,414 (k_T^{из}) = 30/1,414 (106) = 0,199 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

7. Термическое сопротивление теплопроводности пластины:

$$R_{пл} = \delta/\lambda = 0,0284/0,2 = 0,142 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}.$$

8. Объемная теплоемкость:

$$(c_p) = (B_P)^2 \cdot (\tau_P) / (\pi \cdot \lambda) = (30)^2 \cdot 1140 / (3,14 \cdot 0,2) = 1634 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

9. Температуропроводность:

$$a = \pi/\tau_P \cdot (k_T^{из})^2 = 3,14 / [2 \cdot 1140 \cdot (106)^2] = 0,122 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Массовая (весовая) теплоемкость:

$$c = (c_p)/\rho = 1,634 \cdot 10^6 / 1183 = 1381 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

11. Тепловая инерция:

$$b = \lambda \cdot (c_p) = 0,2 \cdot 1634000 = 3268000 \text{ Дж}^2/(\text{с} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}^2).$$

12. Термоизоляция:

$$R_{терм} = 4,34 (k_T^{из} \cdot \delta) = 4,34 (106 \cdot 0,0284) = 13,06 \text{ дБ}.$$

*Расчет ТЗФС оргстекла.*

Основные тепло-звукофизические свойства (ТЗФС) материалов, вычисляются при максимальной плотности теплового потока  $q_{II}^{max}$  и  $\tau_P$ .

1. Поверхностная скорость температурной волны:

$$S_{II} = a/\delta = (0,122 \cdot 10^{-6})/0,0284 = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}.$$

Скорость температурной волны  $S_{II}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{II}^* = a/1\text{м} = 0,122 \cdot 10^{-6} \text{ м}/\text{с}$ . Скорость температурной волны  $S_{II} > S_{II}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{II}/S_{II}^* = 4,3/0,122 = 35$ .

2. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{пл}$  ,:

$$\psi_{\Pi}^{пл} = 2/R_{\Pi л} = 2/0,142 = 14,1 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

3. Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_K$ :

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{пл}) = (4,3 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 33,6/14,1 = 44,06 \cdot 10^{-12}.$$

4. Звуковая (акустическая) скорость:

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K = (0,122 \cdot 10^{-6})/(44,06 \cdot 10^{-12}) = 2769 \text{ м/с}.$$

5. Модуль упругости Юнга:

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (2769)^2 \cdot 1183 = 9,59 \cdot 10^9 \text{ Па} = 9,6 \text{ ГПа}.$$

Резюме.

1. Приведены результаты физического эксперимента по определению ТЗФС материала оргстекла в двух вариантах:  $q_{\Pi}^{max}$  и  $\tau_r$ , (разд. 5.3.3) без теплоизолятора и  $q_{\Pi}^{max}$  и  $\tau_r$ , при отражении температурной волны с использованием теплоизолятора. Результаты физического эксперимента показывают высокую сходимость, а также соответствие табличным значениям (табл. 7.3).

2. Время достижения максимальной плотности теплового потока на поверхности пластины  $q_{\Pi}^{max}$  в установке FOKUS (разд. 5.3.3) составляет:  $\tau_r = 69$  мин, а в установке Fokus-M меньше:  $\tau_{B1} = 19$  мин (то есть, в 3,6 раз).

3. Значения термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$ , при одинаковой толщине образца ( $\delta = 28,4$  мм), для двух рассматриваемых режимов разные, ввиду разного значения волнового температурного числа в пластине:  $k_{\Pi}^{из} > k_{\Pi}^{пл}$  ( $106 > 80$ ).

Термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  оргстекла толщиной  $\delta = 0,0284$ м и с теплоизолятором выше, а значит и более эффективна, чем термоизоляция оргстекла, при той же толщине, но без теплоизолятора.

4. Конструкция устройства Fokus-1 может располагаться под любым углом к горизонту.

В таблице 7.3 приведены основные ТЗФС оргстекла, полученные экспериментально при двух тепловых режимах в установке FOKUS и Fokus-1:

—  $q_{\Pi}^{max}$  и  $\tau_r$ , согласно табл. 5.7 (разд. 5.3.3);

—  $q_{\Pi}^{max}$  и  $\tau_r$ , согласно расчетов при отражении температурной волны

Таблица 7.3 Основные свойства (ТЗФС) оргстекла при  $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ ;  
 $\rho = 1338 \text{ (кг/м}^3\text{)}, \delta = 0,0284 \text{ м.}$

Параметр	ФОКУС при $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ и $\tau_{\text{р}}$ (табл. 5.7)	Fokus-1 при $q_{\text{п}}^{\text{max}}$ и $\tau_{\text{р}}$ (отражение)	Табличные значения
1. Время $\tau_{\text{р}}$ , мин	69	19	—
2. Волновое число $k_{\text{T}}^{\text{пл}}$ , $\text{м}^{-1}$	80	106	—
3. Теплопроводность $\lambda$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,2	0,2	0,19...0,21
4. Объемная теплоемкость (ср), $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$	1684	1634	1500...1700
5. Температуропроводность $a \cdot 10^6$ , $\text{м}^2/\text{с}$	0,119	0,122	0,115...0,125
6. Тепловая инерция, $\text{Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2)$	337000	3270000	—
7. Термоизоляция, дБ	9,86	13,06	—
8. Скорость звука, м/с	2831	2769	2680...2830
9. Модуль упругости Юнга, ГПа	9,5	9,6	6...10

## 7.6 Выводы по главе 7

Ранее (разд. 3.4) уже установлено, что термоизоляция  $R_{\text{ТЕРМ}}$  более эффективна при большей толщине пластины  $\delta$  и меньшим коэффициентом температуропроводности вещества  $a$ . Однако, приведенная методика с отражением температурной волны и параметром термоизоляции  $R_{\text{ТЕРМ}}$  (в децибелах), позволяет выявить более энергоэффективный материал, например, в процессе производства (завод, предприятие) или в процессе эксплуатации (строительство, машины, установки).

Предлагаемый способ и устройство неразрушающего контроля ТЗФС материалов Fokus-M позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, являются перспективными и выгодно отличаются от известных методов: количеством параметров ТЗФС, энергоэффективностью, быстродействием, малой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью.

## ГЛАВА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗВУКОВОЙ АНАЛОГИИ

### 8.1 Математический эксперимент определения скорости звука металлов по теплофизическим свойствам

Если использовать философские понятия, логику и цифры, то монографию (и этот раздел) можно охарактеризовать или обосновать как основы математического эксперимента в технической теплофизике.

Предположим, что имеются теплофизические свойства металла, определенные либо экспериментально, либо табулированы с использованием готовых значений из справочной литературы (публикаций) или иной информации (интернет), а именно: плотность  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), теплопроводность  $\lambda$  ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ), теплоемкость массовая (весовая)  $c$  ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ) или теплоемкость объемная  $c\rho$  ( $\text{Дж}/\text{м}^3\cdot\text{К}$ ), температуропроводность  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ).

Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c\rho$ ) ограждения связаны соотношениями (7), (8) и (9):

$$a = \lambda/(c\rho), \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \quad (c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}).$$

Предположим, что имеется плоская стенка (пластина) из материала толщиной  $\delta = 1\text{ м}$ . Тогда, согласно математического эксперимента (разд. 3.8), поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\text{П}}^*$  ( $\text{м}/\text{с}$ ), при толщине пластины  $\delta = 1\text{ м}$ , численно пропорциональна температуропроводности вещества  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), т.е. устанавливается соотношение (73 а):

$$S_{\text{П}}^* = a, \text{ при } \delta = 1\text{ м}.$$

Согласно математического эксперимента раздела 3.7, поверхностная плотность  $\rho_{\text{П}}$  ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ), удельная плотность  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), толщина пластины, стенки  $\delta$  ( $\text{м}$ ), связаны соотношением (67):  $\rho_{\text{П}} = \rho \cdot \delta$ , или  $\rho = \rho_{\text{П}}/\delta$ .

Следовательно, при прохождении гармонических колебаний, температурной или звуковой волны через один квадратный метр поверхности, на один погонный метр толщины (глубины), то есть, через один метр толщины образца (пластины), поверхностная и удельная плотность материала (вещества) равны численно, а именно:  $\rho_{\text{П}} = \rho$ , при  $\delta = 1\text{ м}$ .

Согласно фононной теории теплопроводности [17], за счет движения электронов в металлах теплопроводность и температуропроводность примерно на два порядка выше, чем в строительных материалах. Длина свободного пробега фононов составляет согласно (88):  $L_{\text{Ф}} = 3a/C_{\text{Ф}}$ , м.

Поэтому, возможно предположить, что термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{пл}$ , согласно (63), обратно пропорционально восьмой части (0,125) термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\PiЛ}$ :

$$\psi_{\Pi}^{пл} = 8/R_{\PiЛ} = 1/(0,125 \cdot R_{\PiЛ}), \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

Термическое сопротивление теплопроводности пластины  $R_{\PiЛ}$  постоянная характеристика материала:  $R_{\PiЛ} = \delta/\lambda$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт.

Тогда соответственно при  $\delta = 1$  м, для твердых металлов (не расплавов) термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{пл}$ , численно пропорционально восьми коэффициентам теплопроводности  $\lambda$ :

$$\psi_{\Pi}^{пл} = 8\lambda, \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

Если математическим экспериментом определяется: поверхностная скорость плоской температурной волны  $S_{\Pi}$  (м/с), термическое напряжение на поверхности  $\psi_{\Pi}$  (Па·м) и поверхностная плотность  $\rho_{\Pi}$  ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ), то безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{К}}$  (число Фокина), согласно (85):

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}).$$

Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{К}}$ , есть отношение поверхностной скорости плоской температурной волны  $S_{\Pi}^*$  (м/с) на глубине материала  $\delta = 1$  м, к скорости звуковой (акустической) волны  $C_A$  (м/с) в изделии, материале (веществе) и согласно (84):

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\Pi}^*/C_A,$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна теплопроводности материала (вещества)  $a$ , то есть  $S_{\Pi}^* = a/(1 \text{ м})$ , м/с.

Безразмерное число волновой скорости  $\Phi_{\text{К}}$  позволяет определить звуковую (акустическую) скорость в материале (веществе) из соотношения (86):

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_{\text{К}}.$$

Подстановка соответствующих зависимостей (8), (63), (67), (84), (85) в соотношение (86), разделение переменных и размерностей, позволяет окончательно установить важное и простое резюме: звуковая (акустическая) скорость в твердых металлах численно пропорциональна восьми массовым (весовым) теплоемкостям, если весовая теплоемкость  $c$  выражена в Дж/(кг · К):

$$C_A = 8c, \text{ м/с}.$$

## 8.2 Численное определение скорости звука металлов

Рассмотрим твердые металлы (не расплавы), для которых табулирована весовая теплоемкость  $c$ , в Дж/(кг · К). Согласно разд. 8.1 и математического эксперимента, звуковая (акустическая) скорость:  $C_A = 8c$ , м/с.

В таблице 8.1 приведены результаты численного расчета звуковой (акустической) скорости, а также табличные (табулированные) значения звуковой (акустической) скорости в соответствующих твердых металлах.

Таблица 8.1 Звуковая (акустическая) скорость  $C_A$  твердых металлов

Метал	Весовая теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)	Расчетные значения $C_A$ , м/с	Табличные значения $C_A$ , м/с
Алюминий	920	7360	5080...6260
Бронза	381	3048	3060...3760
Латунь	378	3024	2100...3490
Медь	381	3048	2260...3710
Никель	462	3696	2960...4785
Олово	921	7366	2730...3320
Свинец	129	1032	700...1200
Серебро	234	1872	1590...2640
Сталь	462	3696	5050...6100
Цинк	394	3152	2410...3810
Чугун	504	4032	3850...4500

Рассчитанные значения звуковой (акустической) скорости твердых металлов, методом тепло-звуковой аналогии, показывают достаточную сходимость с табличными (табулированными) значениями. Однако, у алюминия и олова, наблюдается значительное расхождение, что именно и подтверждает применимость тепло-звуковой аналогии только к твердым металлам, а у чистого олова и алюминия структура мягкая. Это же касается и металла ртуть, которая по структуре больше схожа с неньютоновской жидкостью.

## 8.3 Выводы по главе 8

Тепло-звуковая аналогия позволяет достаточно точно, просто и надежно определить звуковую (акустическую) скорость твердых металлов.

## ГЛАВА 9 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕПЛООВОГО ПРОСЛУШИВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН В ПРИЗМЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ

### 9.1 Научно-методологические основы процесса симметричного нагрева призмы квадратного сечения

На основе исследований, авторами разработан новый абсолютный способ экспериментального определения ТФС методом неразрушающего контроля, а также теплового прослушивания и температурных волн, основанный на измерении температур и плотности теплового потока на поверхности образца, в виде призмы квадратного сечения. Сущность экспериментального определения ТФС материалов заключается в том, что исследуемый образец в форме призмы квадратного сечения, помещают в экспериментальную цилиндрическую камеру установки, схема которой приведена на рис. 9.1.

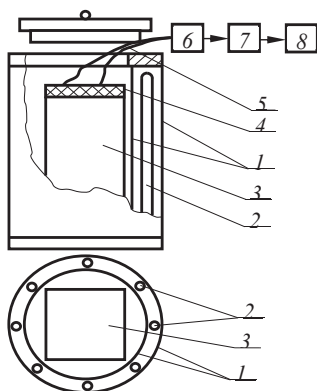


Рис. 9.1. Схема экспериментальной цилиндрической установки:  
1 — внутренний и наружный экраны (полые цилиндры);  
2 — коаксиальные нагреватели;  
3 — исследуемый образец;  
4 — тепловая изоляция;  
5 — термопары;  
6 — коммутатор;  
7 — усилитель;  
8 — ЭВМ

Конструкция экспериментальной цилиндрической установки состоит из двух расположенных друг в друге полых цилиндров 1, выполненных из листового материала (алюминия) и служащих изотермическими поверхностями. В зазоре между цилиндрическими экранами установлены коаксиальные нагреватели 2, которые через стабилизатор подключены к сети переменного тока и обеспечивающие практически симметричные условия нагрева исследуемого образца — призмы квадратного сечения 3. Нагреватель представляет собой равномерно уложенную проволоку из нихрома, помещенную в коаксиально расположенных керамических трубках.

Цилиндрическая камера снизу закрыта, а сверху имеется отверстие с крышкой, через которое образец помещают в установку. Измерение температур на поверхности (ребре и грани) исследуемой призмы квадратного сечения осуществляют термопарами 5, которые подключены к коммутатору 6 и далее, через усилитель 7 и порт ввода-вывода, к ЭВМ 8. Теплоизоляция 4 торцевых поверхностей призмы обеспечивает условие бесконечности длины.

После помещения исследуемого образца в цилиндрическую камеру и его нагрева контролируют изменение температуры на середине ребра и в центре грани призмы, а также температуру окружающей среды (воздуха) для определения плотности теплового потока на поверхности призмы при нагреве суммарным потоком теплоты. При этом не требуется измерений коэффициента теплоотдачи и степени черноты системы.

Призма квадратного сечения бесконечной длины как фигура, в принципе образована пересечением двух неограниченных пластин, толщина которых соответствует двум ее измерениям. То есть, исследуемый образец в форме призмы квадратного сечения должен иметь длину, превышающую ширину грани призмы, примерно в 6 и более раз. Кроме того, теплоизоляция торцевых поверхностей призмы дополнительно обеспечивает условие ее бесконечности.

Математическим экспериментом установлено [90, 92], что для области упорядоченного теплового режима в призме квадратного сечения бесконечной длины с шириной грани  $2\delta$  условия нагрева (или охлаждения) могут быть описаны следующими зависимостями:

$$\frac{\partial T(x, y, \tau)}{\partial \tau} = 2a \frac{\partial^2 T(x, y, \tau)}{\partial x^2}, \quad (9.1)$$

с условиями однозначности:

$$\text{симметрии: } \frac{\partial T(0, x, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (9.2)$$

$$\text{граничными: } T(\delta, y, \tau) = T_{\text{п}}(y, \tau), \quad (9.3)$$

$$\text{начальными: } T(x, y, \tau_*) = T^*(x, y). \quad (9.4)$$

Необходимо отметить, что строгого аналитического решения системы уравнений (9.1)...(9.4), соответствующих суммарному теплообмену на поверхности призмы, представляются чрезвычайно сложными. Такая система строго и явно до настоящего времени не решена. Что же касается технической ее реализации (экспериментальной установки для ее осуществления), то она, наоборот, существенно проще.

Основы тепло-звуковой аналогии позволяют установить, что в результате интенсивного симметричного суммарного теплового воздействия в цилиндрической камере на наружную поверхность призмы квадратного сечения



и весь ее объем, образовывается температурная волна, которая перемещается в глубину призмы от поверхности к центру по всему объему вещества. В случае охлаждения на воздухе предварительно нагретой призмы, температурная волна перемещается из глубины призмы к поверхности.

Причем, в виду симметричности нагрева (охлаждения) призмы, температурная волна проходит расстояние равное только половине толщины или ширины грани призмы. Температурные волны при нагреве симметрично движутся с четырех сторон или граней призмы к ее центру, а при охлаждении призмы — наоборот. Поэтому, обоснованно считать, что при симметричном нагреве (охлаждении), угловая (круговая) частота колебаний температурной волны  $\omega_T^{np}$  в призме квадратного сечения, образованной пересечением двух пластин, согласно (14), соответственно равна:

$$\omega_T^{np} = \pi/z, 1/c, \quad (9.5)$$

где:  $z$  — полный период колебания температурной волны, с.

Также очевидно, что в призме квадратного сечения, время подъема температурной полуволны в стадии упорядоченного теплового режима ( $\tau_p$ ) в процессе нагрева и время предполагаемого спада температурной полуволны в процессе условного охлаждения, будет показывать только половину от времени полного периода колебаний температурной волны, а именно:  $z = 2\tau_p$ .

Тогда угловая (круговая) частота колебаний температурной волны в призме квадратного сечения, образованной пересечением двух пластин, при симметричном нагреве (охлаждении) в любой момент времени ( $\tau_p$ ) в стадии упорядоченного теплового режима, будет иметь соответственно вид:

$$\omega_T^{np} = \pi/z = \pi/2\tau_p, 1/c. \quad (9.6)$$

Оценкой начала наступления упорядоченной части процесса нагрева (охлаждения) в призме квадратного сечения, при симметричном нагреве или охлаждении, служит доля проникновения температурной волны (34):

$$\theta_T = (T_{Ц} - T_0)/(T_{ГР} - T_0), \quad \text{или: } \theta_T = (T_0 - T_{Ц})/(T_0 - T_{ГР}), \quad (9.7)$$

где:  $T_{Ц}$ ,  $T_{ГР}$ ,  $T_0$  — соответственно температура центра призмы квадратного сечения, поверхности центра грани и начальная температура призмы, °С.

Для расчета доли проникновения температурной волны, а также волнового температурного числа применяется методика разд. 3.2.

Физический и математический эксперимент при симметричном нагреве (охлаждении) призмы квадратного сечения, согласно (34 а), позволяет определить время ( $\tau_p$ ) в стадии упорядоченного теплового режима, при котором доля

проникновения температурной волны составит:  $\theta_T = 0,44$ , а безразмерное волновое число при этом:  $H_T = 0,82$ , что гарантируют наступление упорядоченного периода нагрева (охлаждения) в призме с погрешностью в 1 %.

Используя полученные значения математического эксперимента: долю проникновения температурной волны  $\theta_T = 0,44$ , безразмерное волновое число  $H_T = 0,82$ , время нагрева или охлаждения  $\tau_p$ , волновое число температурной волны в отдельной пластине, определяется по формуле (29):

$$k_T^{np} = H_T / \delta_*, \text{ м}^{-1}, \quad (9.8)$$

где:  $\delta_*$  — расстояние между точками измерения температур центра призмы и поверхности центра грани, то есть половину ширины грани призмы, м.

Следовательно, если известно расстояние  $\delta_*$ , между точками измерения температур: центра призмы и поверхности центра грани, а также при достижении доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T = 0,44$ , безразмерное волновое число  $H_T = 0,82$ , что гарантируют стадию упорядоченного периода нагрева (охлаждения) с погрешностью 1 %.

Тогда в момент времени ( $\tau_p$ ), в стадии упорядоченного теплового режима, волновое число температурной волны в призме квадратного сечения  $k_T^{np}$ , образованной пересечением двух пластин, определится из соотношения:

$$k_T^{np} = 2(H_T / \delta_*) = 2(0,82 / \delta_*) = 1,64 / \delta_*, \text{ м}^{-1}. \quad (9.9)$$

Если говорить о методе неразрушающего контроля, то температуру центра призмы квадратного сечения (а возможно и для контроля) можно определить по поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра, не проникая с термопарой внутрь объема призмы и не нарушая ее целостность. При этом нет необходимости знать такие теплофизические характеристики вещества, как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и степень черноты.

Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра призмы квадратного сечения  $T_{ц.пр.}$  по формуле (35 а) или (35 б):

$$\text{— при нагреве: } T_{ц.пр.} = T_{ср} - [(T_{ср} - T_{гр})^2 / (T_{ср} - T_p)], \quad (9.10)$$

$$\text{— при охлаждении: } T_{ц.пр.} = T_{ж} + [(T_{гр} - T_{ж})^2 / (T_p - T_{ж})], \quad (9.11)$$

где:  $T_{ср}$ ,  $T_{ж}$ ,  $T_{гр}$ ,  $T_p$  — соответственно температура среды (нагрева или охлаждения), центра поверхности грани, середины ребра на поверхности.

Следовательно, при нагреве или охлаждении призмы квадратного сечения в экспериментальной цилиндрической установке требуется измерять температуру только на ее поверхности: в центре грани и на середине ребра. В этом

случае отпадает необходимость проникать с термопарой внутрь тела и разрушать образец, что в итоге позволяет определять ТФС исследуемого материала без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик.

Для измерения температур на поверхности центра грани и середины ребра призмы квадратного сечения, методом неразрушающего контроля, разработано устройство с использованием контактных термопар [90].

Для физического эксперимента и определения ТФС материалов, возможен один из трех вариантов:

а) симметричный нагрев призмы квадратного сечения в предварительно прогретой экспериментальной цилиндрической установке (рис. 9.1);

б) охлаждение призмы на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции после предварительного прогрева ее в цилиндрической установке (рис. 9.1) до термодинамического температурного равновесия;

в) нагрев призмы на воздухе при комнатной температуре и естественной конвекции после предварительного охлаждения ее до термодинамического температурного равновесия в холодильнике или жидком азоте;

г) симметричный нагрев призмы квадратного сечения, помещенной вместе с экспериментальной установкой (рис. 9.1), в условиях вакуума.

Математический эксперимент по определению ТФС материалов позволяет выявить следующие закономерности.

А) При симметричном нагреве призмы квадратного сечения в предварительно прогретой цилиндрической установке (рис. 9.1), плотность теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения  $q_{\text{ГР}}$ , зависит от температуры среды в экспериментальной установке  $T_{\text{СР}}$  и температуры призмы в центре ее грани  $T_{\text{ГР}}$ .

Плотность теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения  $q_{\text{ГР}}$  в процессе симметричного нагрева ее в цилиндрической нагревательной установке (рис. 9.1), в момент времени ( $\tau_{\text{Р}}$ ), то есть в стадии упорядоченного теплового режима, определяется по формуле:

$$q_{\text{ГР}} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2. \quad (9.12)$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_{\text{СР}} - T_{\text{ГР}}$ , °С,

Зависимость (9.12) используется когда температура воздуха внутри экспериментальной установки ( $T_{\text{СР}}$ ) изменяется от (+ 40) до (+ 100) °С, а температура грани на поверхности призмы квадратного сечения  $T_{\text{ГР}}$  изменяется от (+ 10) до (+ 30) °С.

Б) При симметричном охлаждении призмы квадратного сечения при комнатной температуре и естественной конвекции, после предварительного

прогрева ее в цилиндрической установке до термодинамического температурного равновесия, плотность теплового потока на поверхности призмы зависит от температуры в центре ее грани  $T_{ГР}$  и температуры наружного воздуха  $T_B$ , при котором производят охлаждение призмы.

Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{ПР}$  в процессе охлаждения, в момент времени ( $\tau_p$ ) стадии упорядоченного теплового режима, определяется по формуле:

$$q_{ПР} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + 1,5 \cdot (\Delta T)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2. \quad (9.13)$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_{ГР} - T_B$ , °С.

Зависимость (9.13) используется для определения плотности теплового потока на поверхности призмы, когда температура поверхности (грани) изменяется от (-10) до (+100) °С, а температура охлаждаемого воздуха изменяется от (-10) до (+30) °С.

В) При нагреве призмы квадратного сечения при комнатной температуре на воздухе и естественной конвекции, после предварительного охлаждения призмы до термодинамического температурного равновесия, плотность теплового потока на поверхности призмы зависит от температуры в центре ее грани  $T_{ГР}$  и температуры наружного воздуха  $T_B$ , где производят нагрев охлажденной призмы.

Плотность теплового потока на поверхности предварительно охлажденной призмы  $q_{ПР}$  и последующего ее нагрева на воздухе при комнатной температуре, в момент времени ( $\tau_p$ ) стадии упорядоченного теплового режима, определяется по формуле:

$$q_{ПР} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + 1,7(\Delta T)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2. \quad (9.14)$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_B - T_{ГР}$ , °С.

Зависимость (9.14) используется для определения плотности теплового потока на поверхности призмы, когда температура поверхности (грани) изменяется от (-6) до (+25) °С, а температура нагреваемого воздуха изменяется от (+6) до (+30) °С.

Плотность теплового потока  $q_{ПР}$  на поверхности охлажденной призмы при более низких температурах, от (-200 °С) до (-6 °С), в отсутствии лучистого теплообмена на поверхности призмы, например охлажденной в жидком азоте и последующем нагреве ее на воздухе, определяется по формуле:

$$q^* = 0,75 [4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}], \text{ Вт/м}^2. \quad (9.14 \text{ а})$$

Г) Плотность теплового потока на поверхности призмы квадратного сечения  $q_{\text{ПР}}$  в процессе симметричного нагрева ее в цилиндрической нагревательной установке (рис. 9.1), в условиях вакуума, в момент времени ( $\tau_{\text{р}}$ ), то есть в стадии упорядоченного теплового режима, определяется по формуле:

$$q_{\text{ПР}} = 0,75 [4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}], \text{ Вт/м}^2. \quad (9.14 \text{ б})$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_{\text{ср}} - T_{\text{ГР}}$ , °С.

Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{\text{ПР}}$  на поверхности призмы, в момент времени ( $\tau_{\text{р}}$ ) в стадии упорядоченного теплового режима, при нагреве или охлаждении призмы, зависит от начальной температуры  $T_0$  и температуры поверхности центра грани  $T_{\text{ГР}}$  и определяется по формуле:

$$\vartheta_{\text{ПР}} = 0,5 (T_{\text{ГР}} - T_0) = 0,5 (T_0 - T_{\text{ГР}}), \text{ °С}. \quad (9.15)$$

Коэффициент теплоусвоения материала  $B_{\text{ПР}}$  призмы, в момент времени ( $\tau_{\text{р}}$ ), в стадии упорядоченного теплового режима, численно равен:

$$B_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}}/\vartheta_{\text{ПР}}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (9.16)$$

Теплопроводность для призмы в стадии упорядоченного теплового режима ( $\tau_{\text{р}}$ ), согласно (55), определяется по формуле:

$$\lambda = B/1,414 k_{\text{Т}}^{\text{пп}} = 0,707 (B/k_{\text{Т}}^{\text{пп}}) \approx 0,71 (B/k_{\text{Т}}^{\text{пп}}). \quad (9.17)$$

Объемная теплоемкость призмы в стадии упорядоченного теплового режима ( $\tau_{\text{р}}$ ), согласно (48 б, 48 в) и (9.6) определяется по формуле:

$$(ср) = (B_{\text{ПР}})^2/(\omega_{\text{Т}}^{\text{пп}} \cdot \lambda) = (B_{\text{ПР}})^2 \cdot (2\tau_{\text{р}})/(\pi \cdot \lambda). \quad (9.18)$$

Волновое число температурной волны в призме  $k_{\text{Т}}^{\text{пп}}$ , угловая (круговая) частота колебаний температурной волны  $\omega_{\text{Т}}^{\text{пп}}$  и температуропроводность материала призмы  $a$  (м<sup>2</sup>/с), согласно (18), связаны соотношением:

$$k_{\text{Т}}^{\text{пп}} = (\omega_{\text{Т}}^{\text{пп}}/2a)^{0,5} = (\pi/4 \cdot a \cdot \tau_{\text{р}})^{0,5}, \text{ м}^{-1}. \quad (9.19)$$

Очевидно, что если будет известно волновое число в призме квадратного сечения  $k_{\text{Т}}^{\text{пп}}$  в стадии упорядоченного теплового режима ( $\tau_{\text{р}}$ ), которое определяется согласно (9.9), то зависимость (9.19) позволит определить температуропроводность призмы квадратного сечения:

$$a = \pi / [4\tau_{\text{р}}(k_{\text{Т}}^{\text{пп}})^2], \text{ м}^2/\text{с}. \quad (9.20)$$

Соотношения (9.9)... (9.14), а также (9.15)...(9.20) получены впервые и имеют огромное значение для экспериментального определения теплопроводности, теплоусвоения, температуропроводности, объемной теплоемкости материалов на образцах в форме призмы квадратного сечения, в стадии упорядоченного теплового режима, при симметричном нагреве или охлаждении.

## **9.2 Методика DV экспериментального определения ТФС материалов в призме квадратного сечения**

Методика DV экспериментального определения теплофизических свойств строительных, теплоизоляционных материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения сводится к последовательному выполнению следующих операций или действий: вначале предварительной подготовке и сбора информации, проведение эксперимента, а затем по результатам эксперимента расчет параметров ТФС материала призмы.

Используется готовое изделие или изготавливается образец — призма квадратного сечения размером (например: 50×50) и длиной: 300...500 мм. Изделие (призма) взвешивается на весах и замеряется его масса  $m$  (кг), измеряются линейные размеры, по которым вычисляется объем ( $m^3$ ) и рассчитывается удельная плотность материала  $\rho = m/V$  (кг/ $m^3$ ). Призма с торцов закрывается теплоизолятором (войлоком) для снижения потерь теплоты.

Для экспериментального определения ТФС материалов, возможен один из вариантов.

А). Нагрев призмы квадратного сечения в предварительно прогретой экспериментальной цилиндрической установке (рис. 9.1), когда вначале установка без образца предварительно прогревается до определенной температуры (например, до 80...100 °С), а затем в нее помещается призма квадратного сечения для проведения эксперимента.

Единственным условием при нагреве призмы: температура среды в установке должна быть не выше  $\approx 0,7...0,8$  температуры термодеструкции исследуемого материала, при которой возможно увеличение погрешностей измерений температур, изменения расстояния между термомпарами и др.

Б). Охлаждение призмы на воздухе, при комнатной температуре и естественной конвекции, после ее предварительного прогрева до термодинамического температурного равновесия в экспериментальной или иной нагревательной установке, или сушильном шкафу.

Единственным условием, при охлаждении призмы на воздухе: отсутствие вынужденного движения воздуха, что нарушит естественную конвекцию и условия симметричного охлаждения.

В) Нагрев призмы квадратного сечения при комнатной температуре и естественной конвекции, после ее предварительного охлаждения до термодинамического температурного равновесия в холодильнике (жидком азоте).

Единственным условием, при нагреве призмы на воздухе: отсутствие вынужденного движения воздуха.

Г) Нагрев призмы квадратного сечения, помещенной вместе с экспериментальной установкой (рис. 9.1), в условиях вакуума.

В дальнейшем проводится запись соответствующих параметров:

$T_0$  — начальная температура призмы, °С;

$T_{CP}$ ,  $T_B$  — температура среды в установке или воздуха, °С;

$T_{ГР}$  — температура центра грани на поверхности призмы, °С;

$T_P$  — температура середины ребра на поверхности призмы, °С;

$T_{Ц}$  — температура центра призмы, °С;

$\tau$  — время процесса нагрева или охлаждения, с.

$\tau_P$  — время достижения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения:  $\theta_T = 0,44$ .

Расчет соответствующих показателей ТФС материала призмы квадратного сечения, проводятся при доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T = 0,44$  (время  $\tau_P$ ), что гарантируют стадию упорядоченного периода нагрева (охлаждения) с погрешностью 1 %.

Расчет параметров ТФС проводится в процессе нагрева или охлаждения призмы квадратного сечения по следующему алгоритму.

1. Температура центра призмы квадратного сечения определяется по поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра, не проникая с термопарой внутрь объема призмы и не нарушая ее целостность.

Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра призмы квадратного сечения  $T_{Ц,ПР}$  по формуле (9.10) или (9.11):

$$\text{— при нагреве призмы: } T_{Ц,ПР} = T_{CP} - [(T_{CP} - T_{ГР})^2 / (T_{CP} - T_P)],$$

$$\text{— при охлаждении призмы: } T_{Ц,ПР} = T_B + [(T_{ГР} - T_B)^2 / (T_P - T_B)],$$

где:  $T_{CP}$ ,  $T_B$ ,  $T_{ГР}$ ,  $T_P$  — соответственно температура среды (нагрева), воздуха, центра поверхности грани, середины ребра на поверхности.

В отдельных экспериментах, для контроля и надежности научно методологических основ, температура центра призмы замерялась термопарой.

2. Доля проникновения температурной волны в призме квадратного сечения, при нагреве или охлаждении соответственно, согласно (9.7):

$$\theta_T = (T_{Ц} - T_0) / (T_{ГР} - T_0), \text{ или: } \theta_T = (T_0 - T_{Ц}) / (T_0 - T_{ГР}),$$

где:  $T_{Ц}$ ,  $T_{ГР}$ ,  $T_0$  — соответственно температура центра призмы квадратного сечения, поверхности центра грани и начальная температура, °С.

Выявляется время  $\tau_p$  достижения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T = 0,44$ , что соответствует безразмерному волновому числу  $H_T = 0,82$  и гарантирует стадию упорядоченного периода нагрева (охлаждения) с погрешностью 1 %.

3. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{np} = 2(H_T/\delta_*) = 2(0,82/\delta_*) = 1,64/\delta_*, \text{ м}^{-1}.$$

где:  $\delta_*$  — расстояние между точками измерения температур центра призмы и поверхности центра грани, то есть половину ширины грани призмы, м.

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{ПР}$  в процессе симметричного нагрева в цилиндрической установке печи и в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):

$$q_{ПР} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2,$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_{СР} - T_{ГР}$ , °С.

Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{ПР}$  в процессе охлаждения на воздухе, в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (9.13):

$$q_{ПР} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + 1,5 \cdot (\Delta T)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2.$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_{ГР} - T_B$ , °С.

Плотность теплового потока на поверхности охлажденной призмы  $q_{ПР}$  в процессе ее нагрева в вакуумной установке или на воздухе, после ее предварительного охлаждения до термодинамического температурного равновесия в холодильнике (жидком азоте), в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (9.14):

$$q_{ПР} = 0,75 [4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}], \text{ Вт/м}^2.$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_B - T_{ГР}$ , °С.

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{ПР}$  на поверхности призмы, в момент времени ( $\tau_p$ ), соответственно при нагреве или охлаждении призмы, согласно (9.15):

$$\vartheta_{ПР} = 0,5 (T_{ГР} - T_0) = 0,5 (T_0 - T_{ГР}), \text{ °С}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения материала призмы  $B_{ПР}$ , в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (9.16):

$$B_{ПР} = q_{ПР}/\vartheta_{ПР}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$



7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{\text{ПР}}/1,414 k_T^{\text{ПР}} = 0,707 (B/k_T^{\text{ПР}}).$$

8. Объемная теплоемкость в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (9.18):

$$(c\rho) = (B_{\text{ПР}})^2 \cdot (2\tau_p) / (\pi \cdot \lambda).$$

9. Температуропроводность, в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_p (k_T^{\text{ПР}})^2], \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Соответственно и ранее установлено, что теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), весовая (массовая) теплоемкость ( $c$ ) и плотность ( $\rho$ ) материала или вещества, связаны соотношениями: (7), (8), (9):

$$\lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \quad a = \lambda/(c\rho), \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}); \quad c = (c\rho)/\rho, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Для экспериментальных исследований были изготовлены призмы квадратного сечения: жаростойкий бетон на портландцементе с шамотным наполнителем (цемент — 400 кг/м<sup>3</sup>; тонкомолотая шамотная добавка — 80 кг/м<sup>3</sup>; шамотный песок — 740 кг/м<sup>3</sup>; шамотный щебень — 600 кг/м<sup>3</sup>; водоцементное отношение В/Ц = 0,6), красный обжиговый кирпич, силикатный кирпич, блочное оргстекло (ГОСТ 17622.72); фторопласт Ф — 4 (ТУ 6. 06. 810.76).

Измерение температур исследуемых материалов проводилось термопарами ТХК (градуировки хромель-капель), выполненными из проводов диаметром 0,2 мм. Перед установкой термопар на образце и после проведения опытов все термопары подвергались градуировке. Регистрация показаний термопар может проводиться несколькими способами (рис. 9.1):

- когда термопары подключены к коммутатору б и далее через усилитель 7 и порт ввода-вывода к ЭВМ 8;

- используя измерительный комплекс, структурная схема которого включает измеритель ТРМ 138, с датчиками; блок обработки данных, с логическими и выходными устройствами; интерфейс связи RS — 485 с адаптером интерфейса АС 3 и ЭВМ.

Снижение погрешностей измерения температуры достигалось следующими приемами:

- а) все провода термопар размещались в изотермических плоскостях с теплозащитой от окружающей среды фторопластовым кожухом (кембрик);

б) спаи всех термопар находились в постоянном контакте с исследуемым материалом, а крепление термопар к образцам проводилось следующим способом:

- для бетона и кирпича — соответственно измельченным материалом (порошком) этого исследуемого вещества, смешанным с силикатным клеем;
- для оргстекла — опилками оргстекла, смешанными с дихлорэтаном;
- для фторопласта — опилками фторопласта, смешанными с универсальным клеем (ТУ 6-15-1268-80).

Для измерения температур на поверхности призмы квадратного сечения возможно использование контактного метода неразрушающего контроля. Отличительной особенностью контактных методов неразрушающего контроля ТФС материалов и изделий является непосредственный контакт термоприемников с участком поверхности исследуемого объекта. Для проведения опытов методом неразрушающего контроля и для измерения температуры центра грани и середины ребра, на призме квадратного сечения, разработано устройство (рис. 9.2) с использованием контактных термопар.

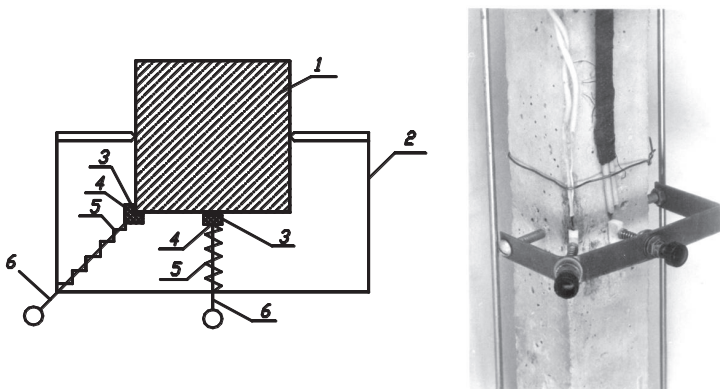


Рис. 9.2 Схема и фото установки контактных термопар на призме квадратного сечения из бетона:

- 1 — призма квадратного сечения; 2 — рамка;  
3 — места установки термопар; 4 — фторопластовый теплоизолятор;  
5 — пружина; 6 — шток

Для измерения температуры центра грани и середины ребра, на призме квадратного сечения установлена рамка 2 с двумя штоками 6, на конце кото-

рых закреплены фторопластовые теплоизоляторы 4. Между поверхностью образца (призмы) и каждым фторопластовым теплоизолятором по изотермической поверхности призмы (вдоль образца) прокладывалась термопара. Пружины 5 создают дополнительное усилие сжатия для обеспечения более надежного контакта спаев термопар с образцом. Подготовленные к опыту образцы (призмы квадратного сечения) с контактными термопарами помещали в испытательную цилиндрическую камеру и симметрично нагревали в установке за счет конвекции и радиации одновременно.

### 9.3 Экспериментальное определение ТФС жаростойкого бетона

Для экспериментального определения ТФС жаростойкого бетона с шамотным заполнителем, возможен один из двух вариантов.

А) По *первому возможному варианту проведения эксперимента* — нагрев призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем в предварительно прогретой экспериментальной цилиндрической установке (рис 9.1), когда вначале установка без образца предварительно прогревается до определенной температуры, а затем в нее помещается призма квадратного сечения с шириной грани  $2\delta = 50$  мм.

На рис. 9.3 приведены экспериментальные распределения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем в цилиндрической печи (рис. 9.1), а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_P$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{ГР}$ );  $\triangle$  — температура центра призмы ( $T_{Ц}$ ).

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = 26$  °С, а температура среды в установке:  $T_{СР} = 83$  °С. Удельная плотность жаростойкого бетона с шамотным наполнителем:  $\rho = 1910$  кг/м<sup>3</sup>.

Также, на рис. 9.3 и в табл. 9.1 приведены значения температуры центра призмы  $T_{Ц,пр}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10). Расхождения температур центра призмы, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле теплового прослушивания не превышают 3 %, что практически подтверждает определение температур в центре призмы квадратного сечения по измерениям температур на поверхности без нарушения целостности образца. Кроме того, в табл. 9.1 приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (9.7).

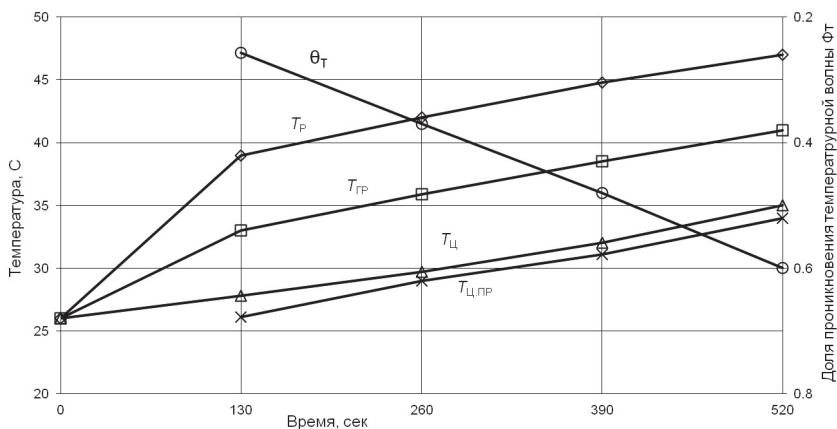


Рис. 9.3 Симметричный нагрев призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона,  $2\delta = 50$  мм,  $\rho = 1910$  кг/м<sup>3</sup>:

- ◇ — температура середины ребра  $T_p$ ;
- — температура центра грани  $T_{ГР}$ ;
- △ — температура центра призмы  $T_{Ц}$ ;
- × — температура центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанная по формуле (9.10);
- — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Таблица 9.1 Экспериментальные и расчетные значения температур при нагреве призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем, шириной грани  $2\delta = 50$  мм., удельной плотностью 1910 кг/м<sup>3</sup>

Время, с	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности — $T_p$ , центра поверхности грани — $T_{ГР}$ , центра призмы — $T_{Ц}$			Расчетная температура центра призмы $T_{Ц,ПР}$	Доля проникновения температурной волны $\theta_T$
	$T_p$	$T_{ГР}$	$T_{Ц}$		
0	26	26	26	—	—
130	39	33	27,8	26,1	0,257
260	42	35,9	29,7	29	0,370
390	44,8	38,5	32	31,1	0,480
520	47	41	35	34	0,600
360	44	38	31,3	31,1	0,441

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.1) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем, шириной грани  $2\delta = 50$  мм., удельной плотностью  $\rho = 1910$  кг/м<sup>3</sup>, при симметричном нагреве ( $\theta_T = 0,44$ ), составляет:  $\tau_p = 360$  с.

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{np} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,024 = 68,3 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при симметричном нагреве, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):

$$\Delta T = T_{CP} - T_{TP} = 83 - 38 = 45 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{пp}$  в процессе симметричного нагрева, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):

$$\begin{aligned} q_{пp} &= 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333} = \\ &= 4,6 (45) + 0,035(45)^2 + (45)^{1,333} = 207 + 71 + 160 = 438 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{пp}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{пp} = 0,5 (T_{TP} - T_0) = 0,5 (38 - 26) = 0,5 \cdot 12 = 6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения материала призмы  $B_{пp}$ , при ( $\tau_p$ ), согласно (9.16):

$$B_{пp} = q_{пp}/\vartheta_{пp} = 438/6 = 73 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{пp}/1,414 k_T^{np} = 0,707 (B/k_T^{np}) = 0,707 (73/68,3) = 0,756 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_p$ ), согласно (9.18):

$$(c_p) = (B_{пp})^2 \cdot (2\tau_p) / (\pi \cdot \lambda) = (73)^2 \cdot (2 \cdot 360) / (3,14 \cdot 0,756) = 1616 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_p (k_T^{np})^2] = 3,14 / [4 \cdot 360 \cdot (68,3)^2] = 0,467 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c_p$ ), массовая теплоемкость ( $c$ ) и плотность ( $\rho$ ) для жаростойкого бетона с шамотным заполнителем, связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c_p) = 1616000 \cdot 0,467 \cdot 10^{-6} = 0,755 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$a = \lambda / (c_p) = 0,756 / 1616000 = 0,468 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c_p) = \lambda / a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) = 0,756 / 0,467 \cdot 10^{-6} = 1618000 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c = (c_p) / \rho = 1616000 / 1910 = 846 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Б) По *второму возможному варианту проведения эксперимента* — охлаждение призмы на воздухе, при комнатной температуре и естественной конвекции, после его предварительного прогрева до термодинамического температурного равновесия в экспериментальной нагревательной установке.

На рис. 9.4 приведены экспериментальные распределения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем в цилиндрической печи (рис.9.1), а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_R$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{ГР}$ );  $\triangle$  — температура центра призмы ( $T_{Ц}$ ).

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = 91 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура наружного (охлаждающего) воздуха:  $T_B = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ . Удельная плотность жаростойкого бетона с шамотным наполнителем:  $\rho = 1910 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Также, на рис. 9.4 и в табл. 9.2 приведены значения температуры центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.11).

Расхождения температур центра призмы, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле теплового прослушивания не превышают 1 %, что практически подтверждает определение температур в центре призмы квадратного сечения по измерениям температур на поверхности без нарушения целостности образца. Кроме того, в табл. 9.2 приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (9.7). Ширина грани призмы  $2\delta = 50 \text{ мм}$ .

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.2) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее охлаждении на воздухе ( $\theta_T = 0,44$ ), составляет примерно:  $\tau_p = 360 \text{ с}$ .

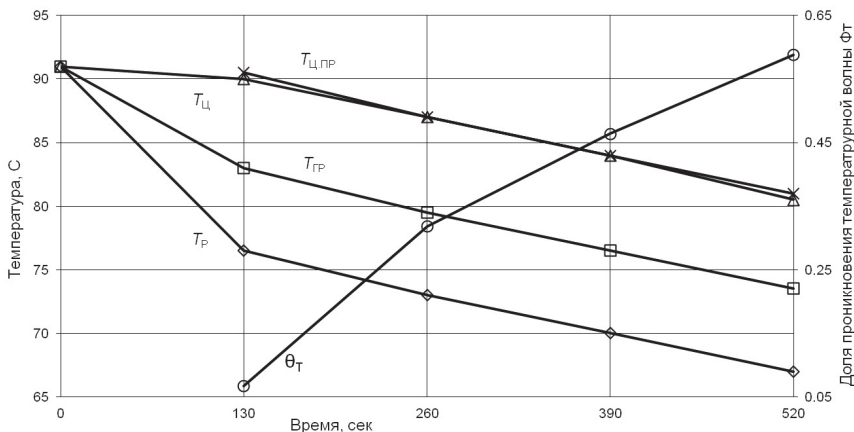


Рис. 9.4 Охлаждение на воздухе призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона,  $2\delta = 50$  мм,  $\rho = 1910$  кг/м<sup>3</sup>:

- ◇ — температура середины ребра  $T_{\text{Р}}$ ;
- — температура центра грани  $T_{\text{ГР}}$ ;
- △ — температура центра призмы  $T_{\text{Ц}}$ ;
- × — температура центра призмы  $T_{\text{Ц,ПР}}$ , рассчитанная по формуле (9.11);
- — доля проникновения температурной волны  $\theta_{\text{T}}$  (ф-ла 9.7).

Таблица 9.2 Экспериментальные и расчетные значения температур при охлаждении призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем, шириной грани  $2\delta = 50$  мм.

Время, мин.	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности — $T_{\text{Р}}$ , центра поверхности грани — $T_{\text{ГР}}$ , центра призмы — $T_{\text{Ц}}$			Расчетная температура центра призмы	Доля проникновения температурной волны
	$T_{\text{Р}}$	$T_{\text{ГР}}$	$T_{\text{Ц}}$	$T_{\text{Ц,ПР}}$	$\theta_{\text{T}}$
0	91	91	91	—	—
130	76,5	83	90	90,5	0,067
260	73	79,5	87	87	0,318
390	70	76,5	84	84	0,464
520	67	73,5	80,5	81	0,588
360	70,5	77	84,8	84,6	0,443

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{np} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,024 = 68,3 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при охлаждении на воздухе, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.13):

$$\Delta T = T_{ГР} - T_B = 77 - 31 = 46 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{ГР}$  при охлаждении на воздухе, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.13):

$$\begin{aligned} q_{ГР} &= 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + 1,5(\Delta T)^{1,333} = \\ &= 4,6 (46) + 0,035 (46)^2 + 1,5 (46)^{1,333} = 211 + 74 + 246 = 531 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

5. Амплитуда колебаний температурной полутолщины  $\vartheta_{ГР}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{ГР} = 0,5 (T_0 - T_{ГР}) = 0,5 (91 - 77) = 0,5 \cdot 14 = 7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения материала призмы  $B_{ГР}$ , при ( $\tau_p$ ), согласно (9.16):

$$B_{ГР} = q_{ГР}/\vartheta_{ГР} = 531/7 = 75,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{ГР}/1,414 k_T^{np} = 0,707 (B/k_T^{np}) = 0,707 (75,8/68,3) = 0,785 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_p$ ), согласно (9.18):

$$(c\rho) = (B_{ГР})^2 \cdot (2\tau_p) / (\pi \cdot \lambda) = (75,8)^2 \cdot (2 \cdot 360) / (3,14 \cdot 0,785) = 1678 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_p (k_T^{np})^2] = 3,14 / [4 \cdot 360 \cdot (68,3)^2] = 0,467 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_B) / \delta^2 = (360 \cdot 0,467 \cdot 10^{-6}) / (0,024)^2 = 0,292$ .

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$ , массовая теплоемкость  $(c)$  и плотность  $(\rho)$  для жаростойкого бетона с шамотным заполнителем, связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c\rho) = 1678000 \cdot 0,467 \cdot 10^{-6} = 0,784 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,785 / 1678000 = 0,468 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$



$$(c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) = 0,785 / 0,467 \cdot 10^{-6} = 1681000 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c = (c\rho)/\rho = 1678000 / 1910 = 878 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Незначительные расхождения полученных параметров ТФС жаростойкого бетона с шамотным заполнителем при нагреве и охлаждении связано с тем, что при охлаждении на воздухе и естественной конвекции возникает некоторый пограничный слой и влияние движения воздуха.

#### 9.4 Экспериментальное определение ТФС красного кирпича

Для экспериментального определения ТФС красного обожженного кирпича воздушно-сухой влажности был использован один вариант — нагрев призмы квадратного сечения в предварительно прогретой экспериментальной цилиндрической установке (рис 9.1), когда вначале установка без образца предварительно прогревается до определенной температуры, а затем в нее помещается призма квадратного сечения.

На рис. 9.5 приведены экспериментальные распределения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из красного кирпича воздушно-сухой влажности в цилиндрической печи (рис. 9.1), а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $t$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_r$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{гр}$ ). Ширина грани призмы  $2\delta = 50$  мм.

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = 24$  °С, а температура среды в установке:  $T_{ср} = 84$  °С. Удельная плотность красного кирпича воздушно-сухой влажности:  $\rho = 1830$  кг/м<sup>3</sup>.

Также, на рис. 9.5 и в табл. 9.3 приведены значения температуры центра призмы  $T_{ц.пр}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10). Кроме того, в табл. 9.3 приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по (9.7).

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.3) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее симметричном нагреве ( $\theta_T = 0,44$ ), составляет:  $\tau_p = 400$  с.

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{пр} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,024 = 68,3 \text{ м}^{-1}.$$

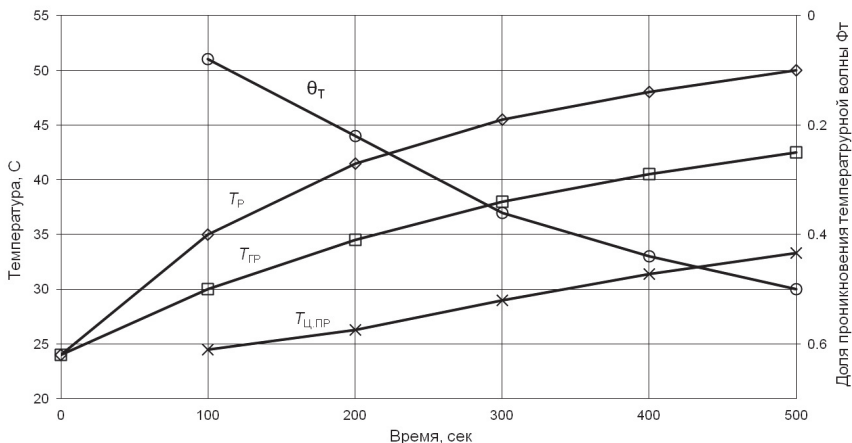


Рис. 9.5 Симметричный нагрев призмы квадратного сечения из красного кирпича,  $2\delta = 50$  мм,  $\rho = 1830$  кг/м<sup>3</sup>:

- ◇ — температура середины ребра  $T_p$ ;
- — температура центра грани  $T_{ГР}$ ;
- × — температура центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанная по формуле (9.10);
- — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Таблица 9.3 Экспериментальные и расчетные значения температур при нагреве призмы квадратного сечения из красного кирпича воздушно-сухой влажностью, шириной грани  $2\delta = 50$  мм, удельной плотностью:  $\rho = 1830$  кг/м<sup>3</sup>

Время, с	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности — $T_p$ , центра поверхности грани — $T_{ГР}$		Расчетная температура центра призмы $T_{Ц,ПР}$	Доля проникновения температурной волны $\theta_T$
	$T_p$	$T_{ГР}$		
0	24	24	—	—
100	35	30	24,5	0,08
200	41,5	34,5	26,3	0,22
300	45,5	38	29,0	0,36
400	48	40,5	31,4	0,44
500	50	42,5	33,3	0,50

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при симметричном нагреве, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):

$$\Delta T = T_{CP} - T_{TP} = 84 - 40,5 = 43,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{TP}$  в процессе симметричного нагрева, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):

$$\begin{aligned} q_{TP} &= 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333} = \\ &= 4,6(43,5) + 0,035(43,5)^2 + (43,5)^{1,333} = 200 + 66 + 153 = 419 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

5. Амплитуда колебаний температурной полутолщины  $\vartheta_{TP}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{TP} = 0,5 (T_{TP} - T_0) = 0,5 (40,5 - 24) = 0,5 \cdot 16,5 = 8,25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения материала призмы  $B_{TP}$ , при ( $\tau_p$ ), согласно (9.16):

$$B_{TP} = q_{TP} / \vartheta_{TP} = 419 / 8,25 = 51 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{TP} / 1,414 k_T^{TP} = 0,707 (B/k_T^{TP}) = 0,707 (51/68,3) = 0,528 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_p$ ), согласно (9.18):

$$(c_p) = (B_{TP})^2 \cdot (2\tau_p) / (\pi \cdot \lambda) = (51)^2 \cdot (2 \cdot 400) / (3,14 \cdot 0,528) = 1255 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_p (k_T^{TP})^2] = 3,14 / [4 \cdot 400 \cdot (68,3)^2] = 0,421 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_B) / \delta^2 = (400 \cdot 0,421 \cdot 10^{-6}) / (0,024)^2 = 0,292$ .

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c_p$ ), массовая теплоемкость ( $c$ ) и плотность ( $\rho$ ) для красного кирпича воздушно-сухой влажности, шириной грани  $2\delta = 50$  мм., удельной плотностью:  $\rho = 1830 \text{ кг/м}^3$ , связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c_p) = 1255000 \cdot 0,421 \cdot 10^{-6} = 0,528 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$a = \lambda / (c_p) = 0,528 / 1255000 = 0,421 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c_p) = \lambda / a, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)} = 0,528 / 0,421 \cdot 10^{-6} = 1254000 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$c = (c_p) / \rho = 1255000 / 1830 = 686 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

## 9.5 Экспериментальное определение ТФС силикатного кирпича

Для экспериментального определения ТФС силикатного кирпича воздушно-сухой влажности был использован один вариант — нагрев призмы квадратного сечения в предварительно прогретой экспериментальной цилиндрической установке (рис 9.1), когда вначале установка без образца предварительно прогревается до определенной температуры, а затем в нее помещается призма квадратного сечения шириной грани  $2\delta = 50$  мм.

На рис. 9.6 приведены экспериментальные распределения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из силикатного кирпича воздушно-сухой влажности в цилиндрической печи (рис.9.1), а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_P$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{ГР}$ ).

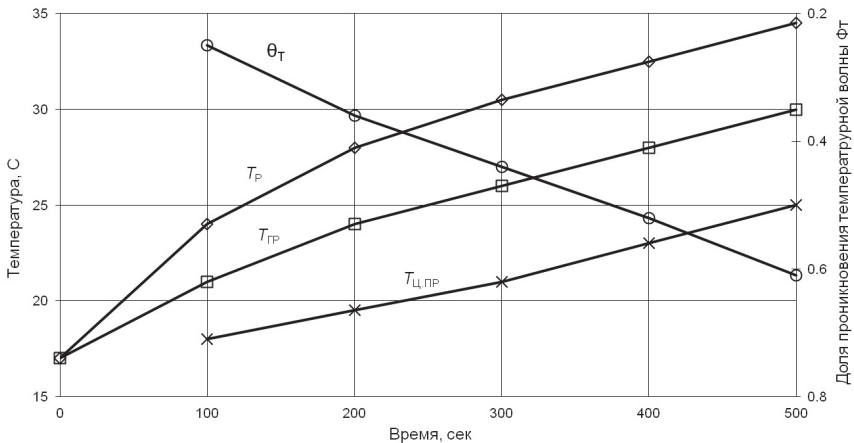


Рис. 9.6 Симметричный нагрев призмы квадратного сечения из силикатного кирпича,  $2\delta = 50$  мм,  $\rho = 1960$  кг/м<sup>3</sup>:

- $\diamond$  — температура середины ребра  $T_P$ ;
- $\square$  — температура центра грани  $T_{ГР}$ ;
- $\times$  — температура центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанная по формуле (9.10);
- $\circ$  — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = 17$  °C, а температура среды в установке:  $T_{СР} = 76$  °C. Удельная плотность силикатного кирпича воздушно-сухой влажности:  $\rho = 1960$  кг/м<sup>3</sup>.

Также, на рис. 9.6 и в табл. 9.4 приведены значения температуры центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10). Кроме того, в табл. 9.4 приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по (9.7).

Таблица 9.4 Экспериментальные и расчетные значения температур при нагреве призмы квадратного сечения из силикатного кирпича воздушно-сухой влажности, шириной грани  $2\delta = 50$  мм, плотностью:  $\rho = 1960$  кг/м<sup>3</sup>

Время, с	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности — $T_P$ , центра поверхности грани — $T_{ГР}$		Расчетная температура центра призмы	Доля проникновения температурной волны
	$T_P$	$T_{ГР}$	$T_{Ц,ПР}$	$\theta_T$
0	17	17	—	—
100	24	21	18	0,25
200	28	24	19,5	0,36
300	30,5	26	21	0,44
400	32,5	28	23	0,52
500	34,5	30	25	0,61

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.4) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее симметричном нагреве ( $\theta_T = 0,44$ ), составляет:  $\tau_P = 300$  с.

2. Волновое температурное число при  $\tau_P$ , согласно (9.9):

$$k_T^{np} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,024 = 68,3 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при симметричном нагреве, при ( $\tau_P$ ), согласно (9.12):

$$\Delta T = T_{CP} - T_{ГР} = 76 - 26 = 50 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{ПР}$  в процессе симметричного нагрева, при ( $\tau_P$ ), согласно (9.12):

$$q_{ПР} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333} = 4,6(50) + 0,035(50)^2 + (50)^{1,333} = 230 + 88 + 184 = 502 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{\text{ПР}}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{\text{ПР}} = 0,5 (T_{\text{ГР}} - T_0) = 0,5 (26 - 17) = 0,5 \cdot 9 = 4,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения призмы  $B_{\text{ПР}}$ , при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.16):

$$B_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}}/\vartheta_{\text{ПР}} = 502/6 = 83,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{\text{ПР}}/1,414 k_{\text{T}}^{\text{ПР}} = 0,707 (B/k_{\text{T}}^{\text{ПР}}) = 0,707 (83,6/68,3) = 0,865 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.18):

$$(c_{\text{P}}) = (B_{\text{ПР}})^2 \cdot (2\tau_{\text{P}}) / (\pi \cdot \lambda) = (83,6)^2 \cdot (2 \cdot 300) / (3,14 \cdot 0,865) = 1544 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_{\text{P}}(k_{\text{T}}^{\text{ПР}})^2] = 3,14 / [4 \cdot 300 \cdot (68,3)^2] = 0,561 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_{\text{B}}) / \delta^2 = (300 \cdot 0,561 \cdot 10^{-6}) / (0,024)^2 = 0,292.$

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c_{\text{P}}$ ), массовая теплоемкость ( $c$ ) и плотность ( $\rho$ ) для силикатного кирпича воздушно-сухой влажности, шириной грани  $2\delta = 50$  мм., плотностью:  $\rho = 1960$  кг/м<sup>3</sup>, связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c_{\text{P}}) = 1544000 \cdot 0,561 \cdot 10^{-6} = 0,866 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$a = \lambda / (c_{\text{P}}) = 0,865 / 1544000 = 0,56 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c_{\text{P}}) = \lambda / a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) = 0,865 / 0,561 \cdot 10^{-6} = 1542000 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c = (c_{\text{P}}) / \rho = 1544000 / 1960 = 788 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

## 9.6 Экспериментальное определение ТФС оргстекла

Для экспериментального определения ТФС блочного оргстекла (ГОСТ 17622), возможен один из двух вариантов.

А) По *первому возможному варианту проведения эксперимента* — нагрев призмы квадратного сечения из оргстекла в предварительно прогретой экспериментальной цилиндрической установке (рис 9.1), когда вначале установка без образца предварительно прогревается до определенной температуры, а затем в нее помещается призма квадратного сечения.

На рис. 9.7 приведены экспериментальные распределения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из оргстекла в печи (рис.9.1), а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_P$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{ГР}$ );  $\triangle$  — температура центра призмы ( $T_{Ц}$ ).

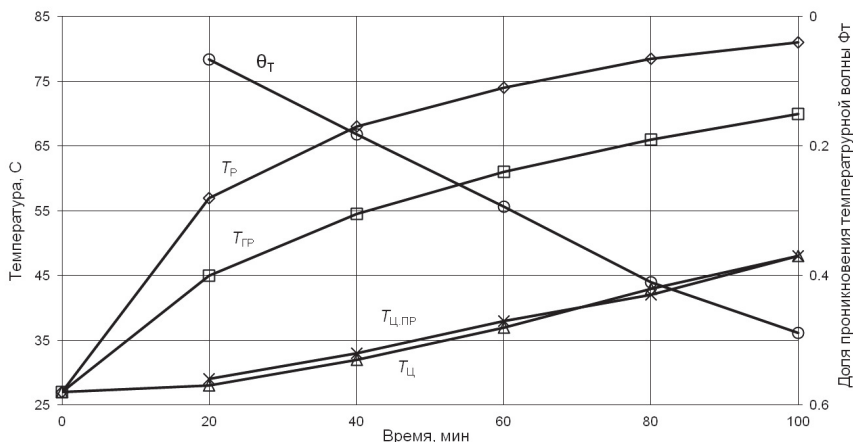


Рис. 9.7 Симметричный нагрев призмы квадратного сечения из оргстекла,  $2\delta = 90$  мм,  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>:

- $\diamond$  — температура середины ребра  $T_P$ ;
- $\square$  — температура центра грани  $T_{ГР}$ ;
- $\triangle$  — температура центра призмы  $T_{Ц}$ ;
- $\times$  — температура центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанная по формуле (9.10);
- $\circ$  — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Начальная температура призмы квадратного сечения из блочного оргстекла составляла:  $T_0 = 27$  °С, а температура среды в установке:  $T_{СР} = 92$  °С. Плотность оргстекла:  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>. Ширина грани призмы  $2\delta = 90$  мм.

Также, на рис. 9.7 и в табл. 9.5 приведены значения температуры центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10). Расхождения температур центра призмы, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле теплового прослушивания не превышают 3 %, что практически подтверждает определение температур в центре призмы квадратного сечения по измерениям температур на поверхности без нарушения це-

лостности образца. Кроме того, в табл. 9.5 приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (9.7).

Таблица 9.5 Экспериментальные и расчетные значения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из оргстекла, шириной грани  $2\delta = 90$  мм, удельной плотностью  $1180$  кг/м<sup>3</sup>:

Время, мин.	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности – $T_P$ , центра поверхности грани – $T_{ГР}$ , центра призмы – $T_{Ц}$			Расчетная температура центра призмы	Доля проникновения температурной волны
	$T_P$	$T_{ГР}$	$T_{Ц}$	$T_{Ц,ПР}$	$\theta_T$
0	27	27	27	–	–
20	57	45	28	29	0,066
40	68	54,5	32	33	0,182
60	74	61	37	38	0,294
80	78,5	66	43	42	0,410
100	81	70	48	48	0,488
83	79	67	44,5	44	0,439

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.5) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее симметричном нагреве ( $\theta_T = 0,44$ ):  $\tau_p = 83,3$  мин = 4998 с  $\cong$  5000 с.

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{np} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,045 = 36,4 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при симметричном нагреве, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):

$$\Delta T = T_{CP} - T_{ГР} = 92 - 67 = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{ПР}$  в процессе симметричного нагрева, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):



$$q_{\text{ПР}} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333} =$$

$$= 4,6 (25) + 0,035(25)^2 + (25)^{1,333} = 115 + 22 + 73 = 210 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{\text{ПР}}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{\text{ПР}} = 0,5 (T_{\text{ГР}} - T_0) = 0,5 (67 - 27) = 0,5 \cdot 40 = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения призмы  $B_{\text{ПР}}$ , при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.16):

$$B_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}}/\vartheta_{\text{ПР}} = 210/20 = 10,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{\text{ПР}}/1,414 k_{\text{T}}^{\text{ПР}} = 0,707 (B/k_{\text{T}}^{\text{ПР}}) = 0,707 (10,5/36,4) = 0,204 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.18):

$$(c\rho) = (B_{\text{ПР}})^2 \cdot (2\tau_{\text{P}}) / (\pi \cdot \lambda) = (10,5)^2 \cdot (2 \cdot 5000) / (3,14 \cdot 0,204) = 1721 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_{\text{P}}(k_{\text{T}}^{\text{ПР}})^2] = 3,14 / [4 \cdot 5000 \cdot (36,4)^2] = 0,119 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_{\text{B}}) / \delta^2 = (5000 \cdot 0,119 \cdot 10^{-6}) / (0,045)^2 = 0,293.$

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$ , массовая теплоемкость  $(c)$  и плотность  $(\rho)$  для блочного оргстекла, шириной грани  $2\delta = 90$  мм., удельной плотностью  $1180 \text{ кг/м}^3$ , связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c\rho) = 1755000 \cdot 0,116 \cdot 10^{-6} = 0,204 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)};$$

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,204 / 1755000 = 0,116 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a, \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К)} = 0,204 / 0,116 \cdot 10^{-6} = 1758000 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К)};$$

$$c = (c\rho) / \rho = 1755000 / 1180 = 1487 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

Б) По второму возможному варианту проведения эксперимента — охлаждение призмы на воздухе, при комнатной температуре и естественной конвекции, после его предварительного прогрева до термодинамического температурного равновесия в экспериментальной нагревательной установке.

На рис. 9.8 приведены экспериментальные распределения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из блочного орг-

стекла в цилиндрической печи (рис. 9.1), а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_P$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{ГР}$ );  $\triangle$  — температура центра призмы ( $T_{Ц}$ ).

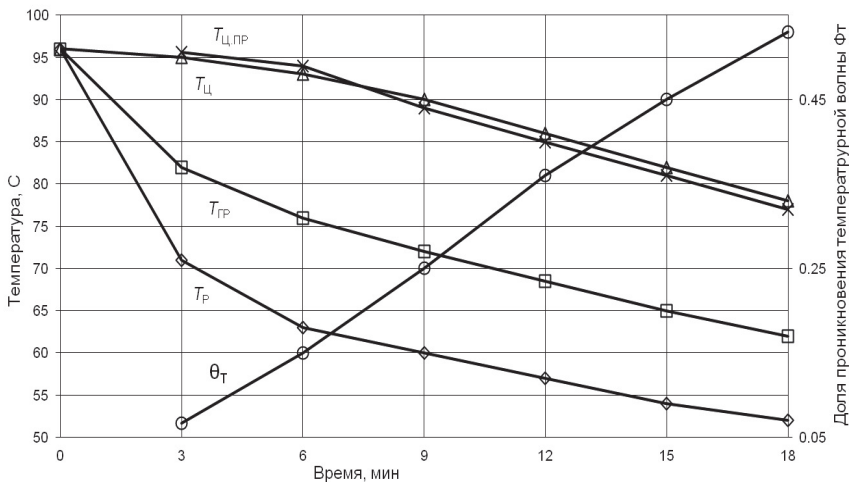


Рис. 9.8 Охлаждение на воздухе призмы квадратного сечения из блочного оргстекла, ширина грани  $2\delta = 40$  мм, удельная плотность  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>:

- $\diamond$  — температура середины ребра  $T_P$ ;
- $\square$  — температура центра грани  $T_{ГР}$ ;
- $\triangle$  — температура центра призмы  $T_{Ц}$ ;
- $\times$  — температура центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанная по формуле (9.11);
- $\circ$  — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = 96$  °С, а температура наружного (охлаждающего) воздуха:  $T_B = 30$  °С. Удельная плотность блочного оргстекла:  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>. Шириной грани призмы  $2\delta = 40$  мм.

Также, на рис. 9.8 и в табл. 9.6 приведены значения температуры центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10).

Расхождения температур центра призмы, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле теплового прослушивания не превышают 1 %, что

практически подтверждает определение температур в центре призмы квадратного сечения по измерениям температур на поверхности без нарушения целостности образца. Кроме того, в табл. 9.6 приведены значения доли проникновения температурной волны в призму квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (9.7).

Таблица 9.6 Экспериментальные и расчетные значения температур при охлаждении на воздухе призмы квадратного сечения из блочного оргстекла, шириной грани:  $2\delta = 40$  мм, удельная плотность  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>:

Время, мин.	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности – $T_R$ , центра поверхности грани – $T_{ГР}$ , центра призмы – $T_{Ц}$			Расчетная температура центра призмы	Доля проникновения температурной волны
	$T_R$	$T_{ГР}$	$T_{Ц}$	$T_{Цпр}$	$\theta_T$
0	96	96	96	–	–
3	71	82	95	95,6	0,07
6	63	76	93	94	0,15
9	60	72	90	89	0,25
12	57	68,5	86	85	0,36
15	54	65	82	81	0,45
18	52	62	78	77	0,53

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.6) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее охлаждении на воздухе ( $\theta_T = 0,44$ ), составляет примерно:  $\tau_p = 15$  мин = 900 с.

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{пр} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,0193 = 85 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при охлаждении на воздухе, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.13):

$$\Delta T = T_{ГР} - T_B = 65 - 30 = 35 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{\text{ПР}}$  при охлаждении на воздухе, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.13):

$$\begin{aligned} q_{\text{ПР}} &= 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + 1,5(\Delta T)^{1,333} = \\ &= 4,6 (35) + 0,035 (35)^2 + 1,5 (35)^{1,333} = 161 + 43 + 172 = 376 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

5. Амплитуда колебаний температурной полутолщины  $\vartheta_{\text{ПР}}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{\text{ПР}} = 0,5 (T_0 - T_{\text{ПР}}) = 0,5 (96 - 65) = 0,5 \cdot 31 = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения материала призмы  $B_{\text{ПР}}$ , при ( $\tau_p$ ), согласно (9.16):

$$B_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}}/\vartheta_{\text{ПР}} = 376/15,5 = 24,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{\text{ПР}}/1,414 k_{\text{T}}^{\text{ПР}} = 0,707 (B/k_{\text{T}}^{\text{ПР}}) = 0,707 (24,3/85) = 0,202 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_p$ ), согласно (9.18):

$$(c\rho) = (B_{\text{ПР}})^2 \cdot (2\tau_p) / (\pi \cdot \lambda) = (24,3)^2 \cdot (2 \cdot 900) / (3,14 \cdot 0,202) = 1676 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_p (k_{\text{T}}^{\text{ПР}})^2] = 3,14 / [4 \cdot 900 \cdot (85)^2] = 0,121 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_p) / \delta^2 = (900 \cdot 0,121 \cdot 10^{-6}) / (0,0193)^2 = 0,292$ .

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$ , массовая теплоемкость  $(c)$  и плотность  $(\rho)$  для блочного оргстекла, связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c\rho) = 1676000 \cdot 0,121 \cdot 10^{-6} = 0,202 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,202 / 1676000 = 0,121 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)} = 0,202 / 0,121 \cdot 10^{-6} = 1670000 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$c = (c\rho) / \rho = 1676000 / 1180 = 1420 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

## 9.7 Экспериментальное определение ТФС фторопласта

Для экспериментального определения ТФС фторопласта возможен один из двух вариантов.

А) По *первому возможному варианту проведения эксперимента* — нагрев призмы квадратного сечения из фторопласта в предварительно прогретой экспериментальной цилиндрической установке (рис 9.1), когда вначале установка без образца предварительно прогревается до определенной температуры, а затем в нее помещается призма квадратного сечения.

На рис. 9.9 приведены экспериментальные распределения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из фторопласта в печи (рис.9.1), а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_R$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{ГР}$ ).

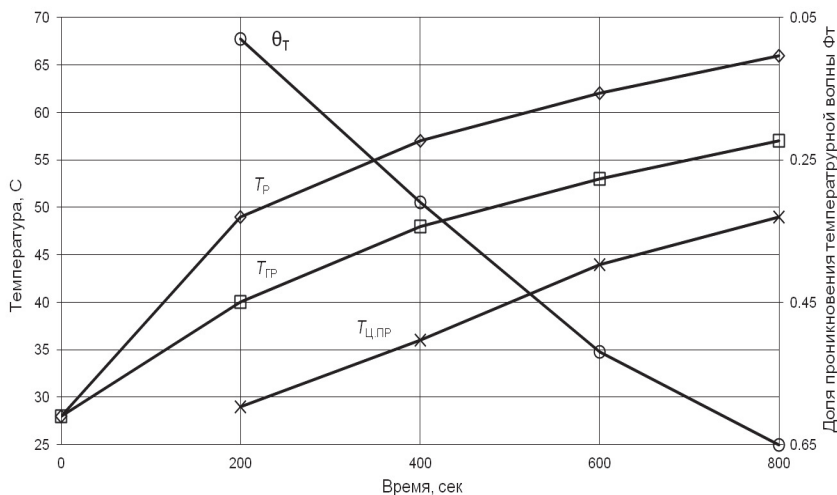


Рис. 9.9 Симметричный нагрев призмы квадратного сечения из фторопласта, шириной грани  $2\delta = 28$  мм, удельной плотностью  $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup>:

- $\diamond$  — температура середины ребра  $T_R$ ;
- $\square$  — температура центра грани  $T_{ГР}$ ;
- $\times$  — температура центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанная по формуле (9.10);
- $\circ$  — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Начальная температура призмы квадратного сечения из фторопласта составляла:  $T_0 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура среды в установке:  $T_{\text{СР}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Плотность оргстекла:  $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$ . Ширина грани призмы  $2\delta = 28 \text{ мм}$ .

Также, на рис. 9.9 и в табл. 9.7 приведены значения температуры центра призмы  $T_{\text{ЦПР}}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10) и значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_{\text{T}}$ , рассчитанные по формуле (9.7).

Таблица 9.7 Экспериментальные и расчетные значения температур при симметричном нагреве призмы квадратного сечения из фторопласта, шириной грани  $2\delta = 28 \text{ мм}$ , удельной плотностью  $2200 \text{ кг/м}^3$ .

Время, с	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности – $T_{\text{Р}}$ , центра поверхности грани – $T_{\text{ГР}}$		Расчетная температура центра призмы	Доля проникновения температурной волны
	$T_{\text{Р}}$	$T_{\text{ГР}}$	$T_{\text{ЦПР}}$	$\theta_{\text{T}}$
0	28	28	–	–
200	49	40	29	0,08
400	57	48	36	0,31
600	62	53	44	0,52
800	66	57	49	0,65
465	59	50	38	0,45

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.7) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее симметричном нагреве ( $\theta_{\text{T}} = 0,44$ ), составляет:  $\tau_{\text{Р}} = 465 \text{ с}$ .

2. Волновое температурное число при  $\tau_{\text{Р}}$ , согласно (9.9):

$$k_{\text{T}}^{\text{нр}} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,0135 = 121 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при симметричном нагреве, при ( $\tau_{\text{Р}}$ ), согласно (9.12):

$$\Delta T = T_{\text{СР}} - T_{\text{ГР}} = 90 - 50 = 40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{\text{ПР}}$  в процессе симметричного нагрева, при ( $\tau_{\text{Р}}$ ), согласно (9.12):

$$q_{\text{ПР}} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333} =$$

$$= 4,6(40) + 0,035(40)^2 + (40)^{1,333} = 184 + 56 + 136 = 377 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\theta_{\text{ПР}}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.15):

$$\theta_{\text{ПР}} = 0,5 (T_{\text{ГР}} - T_0) = 0,5 (50 - 28) = 0,5 \cdot 22 = 11 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения призмы  $B_{\text{ПР}}$ , при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.16):

$$B_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}}/\theta_{\text{ПР}} = 377/11 = 34,3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{\text{ПР}}/1,414 k_{\text{T}}^{\text{ПР}} = 0,707 (B/k_{\text{T}}^{\text{ПР}}) = 0,707 (34,3/121) = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}.$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.18):

$$(c\rho) = (B_{\text{ПР}})^2 \cdot (2\tau_{\text{P}})/(\pi \cdot \lambda) = (34,3)^2 \cdot (2 \cdot 465)/(3,14 \cdot 0,2) = 1742 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{K)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_{\text{P}}$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_{\text{P}}(k_{\text{T}}^{\text{ПР}})^2] = 3,14/[4 \cdot 465 \cdot (121)^2] = 0,115 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_{\text{B}})/\delta^2 = (465 \cdot 0,115 \cdot 10^{-6})/(0,0135)^2 = 0,293.$

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c\rho)$ , массовая теплоемкость  $(c)$  и плотность  $(\rho)$  для фторопласта, шириной грани  $2\delta = 28$  мм., удельной плотностью  $2200 \text{ кг/м}^3$ , связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c\rho) = 1742000 \cdot 0,115 \cdot 10^{-6} = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)};$$

$$a = \lambda/(c\rho) = 0,2/1742000 = 0,115 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{K)} = 0,2/0,115 \cdot 10^{-6} = 1740000 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{K)};$$

$$c = (c\rho)/\rho = 1742000/2200 = 792 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Б) По второму возможному варианту проведения эксперимента — нагрев призмы на воздухе, при комнатной температуре и естественной конвекции, после ее предварительного охлаждения до термодинамического температурного равновесия в жидком азоте при температуре  $(-195,8) \text{ }^\circ\text{C}$ .

На рис. 9.10 приведены экспериментальные распределения температур при низких температурах и нагреве призмы квадратного сечения из фторопласта, а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\triangle$  — температура середины ребра ( $T_{\text{P}}$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{\text{ГР}}$ ).

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = (-195,8)^\circ\text{C}$ , температура наружного воздуха:  $T_B = 27^\circ\text{C}$ , а удельная плотность:  $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$ .

Также, на рис. 9.10 и в табл. 9.8 приведены значения температуры центра призмы  $T_{\text{Ц,ПР}}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10), а также приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (9.7).

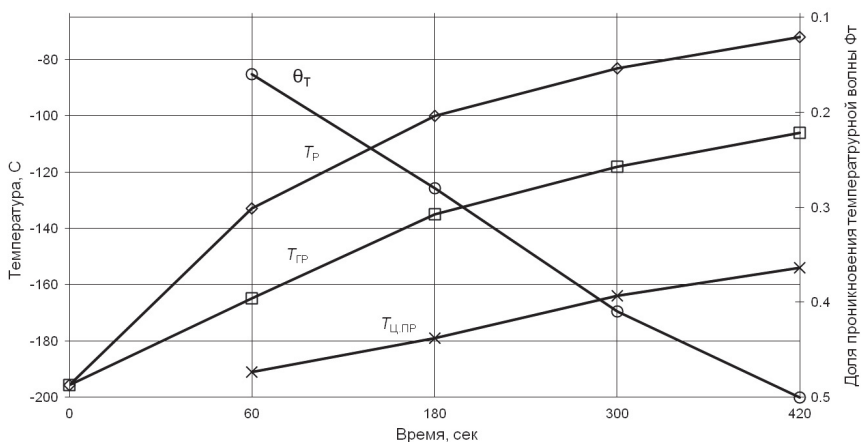


Рис. 9.10 Нагрев на воздухе призмы из фторопласта:  $2\delta = 28 \text{ мм}$ ,  $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$ , после охлаждения в жидком азоте:

- ◇ — температура середины ребра  $T_P$ ;
- — температура центра грани  $T_{TP}$ ;
- × — температура центра призмы  $T_{\text{Ц,ПР}}$ , рассчитанная по формуле (9.10);
- — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Таблица 9.8 Экспериментальные и расчетные значения температур при нагреве призмы квадратного сечения из фторопласта на воздухе, шириной грани  $2\delta = 28 \text{ мм}$ , удельной плотностью  $2200 \text{ кг/м}^3$ , после ее предварительного охлаждения в жидком азоте при температуре  $(-195,8)^\circ\text{C}$ .

Время, с	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности — $T_P$ , центра поверхности грани — $T_{TP}$		Расчетная температура центра призмы $T_{\text{Ц,ПР}}$	Доля проникновения температурной волны $\theta_T$
	$T_P$	$T_{TP}$		
0	$(-195,6)$	$(-195,6)$	—	—
60	$(-133)$	$(-165)$	$(-191)$	0,16
180	$(-100)$	$(-135)$	$(-179)$	0,28



Время, с	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности – $T_p$ , центра поверхности грани – $T_{ГР}$		Расчетная температура центра призмы	Доля проникновения температурной волны
	$T_p$	$T_{ГР}$	$T_{Ц,ПР}$	$\theta_T$
300	(– 83)	(– 118)	(– 164)	0,41
420	(– 72)	(– 106)	(– 154)	0,48
400	(– 73)	(– 109)	(– 157)	0,445

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = (-195,8)$  °С, температура наружного воздуха:  $T_B = 27$  °С, а удельная плотность:  $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup>.

Также, на рис. 9.10 и в табл. 9.8 приведены значения температуры центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10), а также приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (9.7).

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.6) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее охлаждении на воздухе ( $\theta_T = 0,44$ ), составляет примерно:  $\tau_p = 400$  с.

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{np} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,0135 = 121 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при нагреве на воздухе, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.14):

$$\Delta T = T_B - T_{ГР} = 27 - (-109) = 136 \text{ °С}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{ПР}$  при нагреве на воздухе, при ( $\tau_p$ ), при температуре грани ниже ( $-6$  °С), согласно (9.14 а):

$$\begin{aligned} q_{ПР} &= 0,75[4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}] = \\ &= 0,75 [4,6 (136) + 0,015 (136)^2 + (136)^{1,333}] = \\ &= 0,75 [625 + 647 + 698] = 0,75 \cdot 1970 = 1478 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{ПР}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{ПР} = 0,5 (T_{ГР} - T_0) = 0,5 [(-109) - (-195,8)] = 0,5 \cdot 87 = 43,5 \text{ °С}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения материала призмы  $B_{\text{ПР}}$ , при  $(\tau_{\text{Р}})$ , согласно (9.16):

$$B_{\text{ПР}} = q_{\text{ПР}}/\vartheta_{\text{ПР}} = 1478/43,5 = 34 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

7. Теплопроводность при  $(\tau_{\text{Р}})$ , согласно (9.17):

$$\lambda = B_{\text{ПР}}/1,414 k_{\text{T}}^{\text{ПР}} = 0,707 (B/k_{\text{T}}^{\text{ПР}}) = 0,707 (34/121) = 0,198 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

8. Объемная теплоемкость при  $(\tau_{\text{Р}})$ , согласно (9.18):

$$(c_{\text{Р}}) = (B_{\text{ПР}})^2 \cdot (2\tau_{\text{Р}})/(\pi \cdot \lambda) = (34)^2 \cdot (2 \cdot 400)/(3,14 \cdot 0,198) = 1485 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

9. Температуропроводность, при  $(\tau_{\text{Р}})$ , согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_{\text{Р}}(k_{\text{T}}^{\text{ПР}})^2] = 3,14/[4 \cdot 400 \cdot (121)^2] = 0,134 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_{\text{В}})/\delta^2 = (400 \cdot 0,134 \cdot 10^{-6})/(0,0135)^2 = 0,293$ .

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(c_{\text{Р}})$ , массовая теплоемкость  $(c)$  и плотность  $(\rho)$  для фторопласта, шириной грани  $2\delta = 28$  мм, удельной плотностью  $2200 \text{ кг}/\text{м}^3$ , связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c_{\text{Р}}) = 1485000 \cdot 0,134 \cdot 10^{-6} = 0,199 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$a = \lambda/(c_{\text{Р}}) = 0,198/1485000 = 0,133 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c_{\text{Р}}) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}) = 0,198/0,134 \cdot 10^{-6} = 1478000 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К});$$

$$c = (c_{\text{Р}})/\rho = 1485000/2200 = 675 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Незначительные расхождения полученных параметров ТФС призмы квадратного сечения из фторопласта, шириной грани  $2\delta = 28$  мм., удельной плотностью  $2200 \text{ кг}/\text{м}^3$ , после ее предварительного охлаждения до термодинамического температурного равновесия в жидком азоте при температуре  $(-195,8) \text{ }^\circ\text{C}$ , связано с низкими температурами и высоким темпом нагрева на поверхности, что и приводит к образованию турбулентного потока воздуха.

## 9.8 Экспериментальное определение ТФС оргстекла в вакууме

Для экспериментального определения ТФС в условиях вакуума, при наличии только лучистого теплообмена, проводилось на призме квадратного сечения из оргстекла. Вначале призму квадратного сечения помещали в нагревательную экспериментальную установку (рис. 9.1) с начальной комнатной

температурой, а затем экспериментальную установку вместе с исследуемым образцом помещали в вакуумную камеру.

Цилиндрическая вакуумная камера выполнена в виде герметичного стального сосуда диаметром 400 мм, с толщиной стенки 10 мм. Термопары и электрический провод выводились из камеры через уплотнительную вакуумную резину, проложенную между крышкой и корпусом камеры. Используя вакуумный насос 8Н – 1МГ, в камере создавалось разрежение 0,4 Па, после чего, включался нагреватель, и экспериментальная установка вместе с образцом прогревалась в вакуумной камере при работающем вакуумном насосе.

Эксперименты проводились в диапазоне температур 20...100 °С.

На рис. 9.11 приведены экспериментальные распределения температур при нагреве призмы квадратного сечения из оргстекла в условиях вакуума, а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_P$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{ГР}$ ).

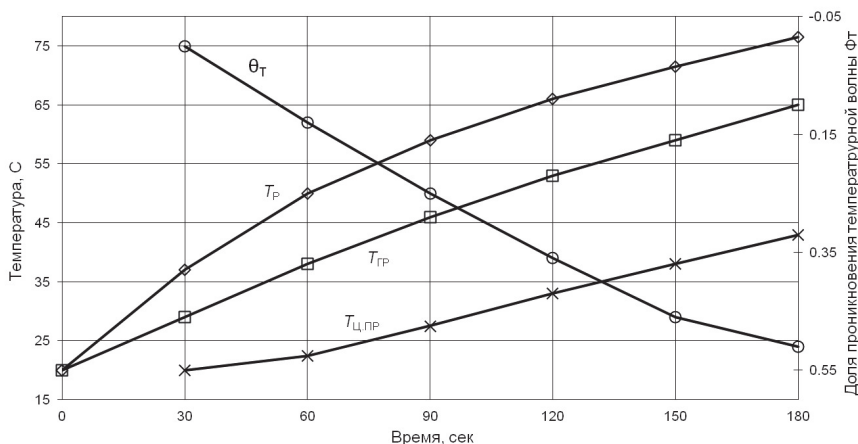


Рис. 9.11 Нагрев в вакууме призмы квадратного сечения из оргстекла:

$$2\delta = 90 \text{ мм}, \rho = 1180 \text{ кг/м}^3:$$

- $\diamond$  — температура середины ребра  $T_P$ ;
- $\square$  — температура центра грани  $T_{ГР}$ ;
- $\times$  — температура центра призмы  $T_{Ц,ПР}$ , рассчитанная по формуле (9.10);
- $\circ$  — доля проникновения температурной волны  $\theta_T$  (ф-ла 9.7).

Начальная температура призмы составляла:  $T_0 = 20$  °С, температура наружного воздуха:  $T_B = 90$  °С, а удельная плотность:  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>. Ширина грани:  $2\delta = 90$  мм.

Также, на рис. 9.11 и в табл. 9.9 приведены значения температуры центра призмы  $T_{Ц,пр}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (9.10), а также приведены значения доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (9.7).

При нагреве призмы квадратного сечения в условиях вакуума, при наличии только лучистого теплообмена и отсутствия конвекции, время достижения упорядоченного теплового режима условно увеличивается в два раза, и следовательно  $\tau_p$  снижается на половину, т. е.:  $\tau_{p*} = 0,5 \tau_p$ .

Таблица 9.9 Экспериментальные и расчетные значения температур при нагреве призмы квадратного сечения из оргстекла в вакууме, шириной грани  $2\delta = 90$  мм, удельной плотностью 1180 кг/м<sup>3</sup>:

Время, мин	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности – $T_p$ , центра поверхности грани – $T_{ГР}$		Расчетная температура центра призмы	Доля проникновения температурной волны
	$T_p$	$T_{ГР}$	$T_{Ц,пр}$	$\theta_T$
0	20	20	–	–
30	37	29	20	0
60	50	38	22,4	0,13
90	59	46	27,5	0,25
120	66	53	33	0,36
150	71,5	59	38	0,46
180	76,5	65	43	0,51
145	71	58	37	0,447

Согласно методике DV экспериментального определения теплофизических свойств материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения, вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 9.9) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре призмы квадратного сечения при ее симметричном нагреве ( $\theta_T = 0,44$ ), составляет:  $\tau_p = 145$  мин = 8700 с.

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (9.9):

$$k_T^{np} = 1,64/\delta_* = 1,64/0,044 = 37,3 \text{ м}^{-1}.$$

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности призмы, при симметричном нагреве, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.12):

$$\Delta T = T_{cp} - T_{tp} = 90 - 58 = 32 \text{ }^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{np}$  в процессе симметричного нагрева, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.14 б):

$$\begin{aligned} q_{np} &= 0,75 [4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}] = \\ &= 0,75 [4,6 \cdot 32 + 0,035(32)^2 + (32)^{1,333}] = 0,75(147 + 36 + 104) = \\ &= 0,75 \cdot 287 = 215 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{np}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.15):

$$\vartheta_{np} = 0,5 (T_{tp} - T_0) = 0,5 (58 - 20) = 0,5 \cdot 38 = 19 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения призмы  $B_{np}$ , при ( $\tau_p$ ), согласно (9.16):

$$B_{np} = q_{np}/\vartheta_{np} = 215/19 = 11,3 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (9.17):

$$\lambda = B_{np}/1,414 k_T^{np} = 0,707 (B/k_T^{np}) = 0,707 (11,3/37,3) = 0,21 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость при только лучистом теплообмене, согласно (9.18) и при  $\tau_{p*} = 0,5\tau_p = 0,5 \cdot 8700 = 4350 \text{ с}.$ :

$$(cp) = (B_{np})^2 \cdot (2\tau_{p*}) / (\pi \cdot \lambda) = (11,3)^2 \cdot (2 \cdot 4350) / (3,14 \cdot 0,21) = 1685 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_p$ ), согласно (9.20):

$$a = \pi / [4\tau_{p*} (k_T^{np})^2] = 3,14 / [4 \cdot 4350 \cdot (37,3)^2] = 0,13 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_B) / \delta^2 = (4350 \cdot 0,13 \cdot 10^{-6}) / (0,044)^2 = 0,292.$

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость  $(cp)$ , массовая теплоемкость  $(c)$  и плотность  $(\rho)$  для блочного оргстекла, связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (cp) = 1685000 \cdot 0,13 \cdot 10^{-6} = 0,21 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$a = \lambda / (cp) = 0,21 / 1685000 = 0,125 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(cp) = \lambda / a, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)} = 0,21 / 0,13 \cdot 10^{-6} = 1616000 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$c = (cp) / \rho = 1685000 / 1180 = 1430 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

## 9.9 Методика DV определения тепло-звукофизических свойств, в призме квадратного сечения

Методика DV экспериментального определения скорости звука твердых строительных, теплоизоляционных, композиционных материалов и изделий на образце — призме квадратного сечения сводится в продолжении или последующему расчету ТФС материала призмы полученных экспериментально в пределах этих температур.

Призма квадратного сечения бесконечной длины как фигура, в принципе образована пересечением двух неограниченных пластин, и соответственно тепловому воздействию с четырех граней одновременно. В виду симметрии используется половина ширины грани призмы —  $\delta_*$ .

1. Поверхностная плотность призмы квадратного сечения:

$$\rho_{\Pi} = 0,5 (\rho \cdot \delta_*), \text{ (кг/м}^2\text{)}. \quad (21)$$

2. Поверхностная скорость температурной волны в призме:

$$S_{\Pi} = 2 (a/\delta_*), \text{ м/с}. \quad (22)$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м}$ , (м/с).

Скорость температурной волны  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^*$ .

3. Термическое напряжение на поверхности пластины  $\psi_{\Pi}^{\text{пл}}$ , согласно (63), твердых строительных, теплоизоляционных, композиционных материалов и изделий имеющих кристаллическую решетку (бетон, кирпич, стекло, керамика), обратно пропорционально восьмой части (0,125) термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\Pi\text{л}}$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пл}} = 1/(0,125 \cdot R_{\Pi\text{л}}) = 8/R_{\Pi\text{л}} = 8/(\delta_*/\lambda) = 8(\lambda/\delta_*), \text{ (Па} \cdot \text{м)}. \quad (23)$$

Термическое сопротивление теплопроводности пластины  $R_{\Pi\text{л}}$  постоянная характеристика материала:  $R_{\Pi\text{л}} = \delta/\lambda$ , (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Термическое напряжение на поверхности призмы квадратного сечения  $\psi_{\Pi}^{\text{пр}}$ , строительных, теплоизоляционных, композиционных материалов и изделий не имеющих кристаллическую решетку (оргстекло, фторопласт, текстолит, шифер и др.), обратно пропорционально четверти (0,25) термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\Pi\text{л}}$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{пр}} = 1/(0,25 \cdot R_{\Pi\text{л}}) = 4/R_{\Pi\text{л}} = 4/(\delta_*/\lambda) = 4(\lambda/\delta_*), \text{ (Па} \cdot \text{м)}. \quad (23 \text{ а})$$

4. Безразмерное число волновой скорости призмы  $\Phi_{\text{к}}$ , согласно (85):

$$\Phi_{\text{к}} = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{\text{пр}}). \quad (24)$$

5. Звуковая (акустическая) скорость материала призмы, в пределах экспериментальных температур, согласно (86):

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_K, \text{ м/с}, \quad (25)$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м}$ .

6. Модуль упругости Юнга:

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho, \text{ ГПа}. \quad (26)$$

### 9.10 Экспериментальное определение тепло-звукофизических свойств, в призме квадратного сечения

Тепло-звукофизические свойства, в том числе и скорость звука, в твердых строительных, теплоизоляционных материалах (бетон, красный и силикатный кирпич, оргстекло, фторопласт), выполненных в виде призмы квадратного сечения, определялась в продолжение экспериментального исследования ТФС (разд. 9).

*А. Жаростойкий бетон с шамотным заполнителем* (разд. 9.3).

Ширина грани призмы  $2\delta = 50$  мм ( $\delta^* = 0,025$  м), удельная плотность бетона  $\rho = 1910$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = 0,756$  Вт/(м·К); температуропроводность  $a = 0,467 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с.

1. Поверхностная плотность призмы, согласно (21):

$$\rho_{\Pi} = 0,5 (\rho \cdot \delta^*) = 0,5 (1910 \cdot 0,025) = 23,87 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

2. Поверхностная скорость температурной волны согласно (22):

$$S_{\Pi} = 2 (a/\delta^*) = 2 (0,467 \cdot 10^{-6}/0,025) = 37,36 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}.$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,467 \cdot 10^{-6}$  м/с. Скорость температурной волны  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 37,4/0,467 = 80$ .

3. Термическое напряжение на поверхности призмы согласно (23):

$$\psi_{\Pi}^{\text{pp}} = 8 (\lambda / \delta^*) = 8 (0,756/0,025) = 242 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

4. Безразмерное число волновой скорости призмы  $\Phi_K$ , согласно (24):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \psi_{\Pi}^{\text{pp}}) = (37,36 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (23,87)/242 = 137 \cdot 10^{-12}.$$

5. Звуковая (акустическая) скорость призмы квадратного сечения из жаростойкого бетона с шамотным заполнителем, в пределах экспериментальных температур, согласно (25):

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_K = 0,467 \cdot 10^{-6} / 137 \cdot 10^{-12} = 3400 \text{ м/с},$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,467 \cdot 10^{-6}$ , м/с.

Справочные значения акустической скорости звука обычного бетона (не жаростойкого) составляет: 4250...5250 м/с.

6. Модуль упругости Юнга, согласно (26):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (3400)^2 \cdot 1910 = 22,08 \text{ ГПа}.$$

Согласно табличным данным [82, 83], модуль упругости Юнга для бетона:  $E_p = 10...30$  ГПа.

Б. *Красный кирпич* (разд. 9.4).

Ширина грани призмы  $2\delta = 50$  мм ( $\delta_* = 0,025$  м), удельная плотность красного кирпича  $\rho = 1830$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = 0,528$  Вт/(м·К); температуропроводность  $a = 0,421 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с.

1. Поверхностная плотность призмы, согласно (21):

$$\rho_{\Pi} = 0,5 (\rho \cdot \delta_*) = 0,5 (1830 \cdot 0,025) = 22,87 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

2. Поверхностная скорость температурной волны согласно (22):

$$S_{\Pi} = 2 (a/\delta_*) = 2 (0,421 \cdot 10^{-6}/0,025) = 33,68 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}.$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,421 \cdot 10^{-6}$  м/с. Скорость температурной волны  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 33,68/0,421 = 80$ .

3. Термическое напряжение на поверхности призмы согласно (23):

$$\Psi_{\Pi}^{\text{пп}} = 8 (\lambda / \delta_*) = 8 (0,528/0,025) = 169 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

4. Безразмерное число волновой скорости призмы  $\Phi_K$ , согласно (24):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi} / \Psi_{\Pi}^{\text{пп}}) = (33,68 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (22,87)/169 = 153 \cdot 10^{-12}.$$

5. Звуковая (акустическая) скорость материала призмы, в пределах экспериментальных температур, согласно (25):

$$C_A = S_{\Pi}^* / \Phi_K = 0,421 \cdot 10^{-6} / 153 \cdot 10^{-12} = 2753 \text{ м/с},$$



где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна теплопроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,421 \cdot 10^{-6}$ , м/с.

Справочные значения акустической скорости звука в красном кирпиче составляет: 2800...3200 м/с.

6. Модуль упругости Юнга, согласно (26):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (2753)^2 \cdot 1830 = 13,87 \text{ ГПа.}$$

Согласно табличным данным [82, 83], модуль упругости Юнга для красного кирпича:  $E_p = 10...15$  ГПа.

В. *Силикатный кирпич* (разд. 9.5).

Ширина грани призмы  $2\delta = 50$  мм ( $\delta_* = 0,025$  м), удельная плотность силикатного кирпича  $\rho = 1960$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = 0,865$  Вт/(м·К); температуропроводность  $a = 0,561 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с.

1. Поверхностная плотность призмы, согласно (21):

$$\rho_{\Pi} = 0,5 (\rho \cdot \delta_*) = 0,5 (1960 \cdot 0,025) = 24,5 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

2. Поверхностная скорость температурной волны согласно (22):

$$S_{\Pi} = 2 (a/\delta_*) = 2 (0,561 \cdot 10^{-6}/0,025) = 44,88 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна теплопроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,561 \cdot 10^{-6}$  м/с. Скорость температурной волны  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 44,88/0,561 = 80$ .

3. Термическое напряжение на поверхности призмы согласно (23):

$$\psi_{\Pi}^{\text{пр}} = 8 (\lambda / \delta_*) = 8 (0,865/0,025) = 276,8 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

4. Безразмерное число волновой скорости призмы  $\Phi_K$ , согласно (24):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{\text{пр}}) = (44,88 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (24,5)/276,8 = 178,3 \cdot 10^{-12}.$$

5. Звуковая (акустическая) скорость материала призмы, в пределах экспериментальных температур, согласно (25):

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K = 0,561 \cdot 10^{-6}/178,3 \cdot 10^{-12} = 3146 \text{ м/с,}$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна теплопроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,561 \cdot 10^{-6}$ , м/с.

Справочные значения акустической скорости звука в силикатном кирпиче составляет: 3400...3650 м/с.

6. Модуль упругости Юнга, согласно (26):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (3146)^2 \cdot 1960 = 19,4 \text{ ГПа.}$$

Согласно табличным данным [82, 83], модуль упругости Юнга для силикатного кирпича:  $E_p = 10 \dots 15 \text{ ГПа}$ .

Г. Оргстекло (разд. 9.6).

Ширина грани призмы  $2\delta = 90 \text{ мм}$  ( $\delta_* = 0,045 \text{ м}$ ), удельная плотность оргстекла  $\rho = 1180 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность  $\lambda = 0,202 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ; температуропроводность  $a = 0,121 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$ .

1. Поверхностная плотность призмы, согласно (21):

$$\rho_{\Pi} = 0,5 (\rho \cdot \delta_*) = 0,5 (1180 \cdot 0,045) = 26,55 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

2. Поверхностная скорость температурной волны согласно (22):

$$S_{\Pi} = 2 (a/\delta_*) = 2 (0,121 \cdot 10^{-6}/0,045) = 5,38 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,121 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ .

Скорость температурной волны на поверхности призмы  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  
 $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 5,38/0,121 = 44,5$ .

3. Термическое напряжение на поверхности призмы согласно (23 а):

$$\psi_{\Pi}^{\text{пп}} = 4 (\lambda / \delta_*) = 4 (0,202/0,045) = 17,95 \text{ (Па}\cdot\text{м)}.$$

4. Безразмерное число волновой скорости призмы  $\Phi_K$ , согласно (24):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{\text{пп}}) = (5,38 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (26,55)/17,95 = 42,8 \cdot 10^{-12}.$$

5. Звуковая (акустическая) скорость материала призмы, в пределах экспериментальных температур, согласно (25):

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K = 0,121 \cdot 10^{-6}/42,8 \cdot 10^{-12} = 2827 \text{ м/с,}$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1 \text{ м}$ , и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,121 \cdot 10^{-6}, \text{ м/с}$ .

Согласно табличным данным [3], для оргстекла (плексиглас), скорость звука составляет  $C_A = 2820 \text{ м/с}$ ; по другим источникам  $C_A = 2680 \text{ м/с}$ . То есть расхождение по скорости звука составляет 1 %.

6. Модуль упругости Юнга, согласно (26):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (2827)^2 \cdot 1180 = 9,4 \text{ ГПа.}$$

Согласно табличным данным, модуль упругости Юнга для оргстекла составляет:  $E_p = 5 \dots 9$  ГПа.

Д. Фторопласт (разд. 9.7).

Ширина грани призмы  $2\delta = 28$  мм ( $\delta_* = 0,014$  м), удельная плотность фторопласта  $\rho = 2200$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = 0,2$  Вт/(м·К); температуропроводность  $a = 0,115 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с.

1. Поверхностная плотность призмы, согласно (21):

$$\rho_{\Pi} = 0,5 (\rho \cdot \delta_*) = 0,5 (2200 \cdot 0,014) = 15,4 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

2. Поверхностная скорость температурной волны согласно (22):

$$S_{\Pi} = 2 (a/\delta_*) = 2 (0,115 \cdot 10^{-6}/0,014) = 16,4 \cdot 10^{-6} \text{ м/с.}$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,115 \cdot 10^{-6}$  м/с.

Скорость температурной волны на поверхности призмы  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 16,4/0,115 = 142,8$ .

3. Термическое напряжение на поверхности призмы согласно (23 а):

$$\Psi_{\Pi}^{\text{пр}} = 4 (\lambda/\delta_*) = 4 (0,2/0,014) = 57,1 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

4. Безразмерное число волновой скорости призмы  $\Phi_K$ , согласно (24):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\Psi_{\Pi}^{\text{пр}}) = (16,4 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (15,4)/57,1 = 72,5 \cdot 10^{-12}.$$

5. Звуковая (акустическая) скорость материала призмы, в пределах экспериментальных температур, согласно (25):

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K = 0,115 \cdot 10^{-6}/72,5 \cdot 10^{-12} = 1586 \text{ м/с,}$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,115 \cdot 10^{-6}$ , м/с.

Согласно табличным данным [3], для фторопласта скорость звука составляет  $C_A = 1400$  м/с; по другим источникам  $C_A = 1500$  м/с. То есть расхождение по скорости звука составляет 3...5 %.

6. Модуль упругости Юнга, согласно (26):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (1586)^2 \cdot 2200 = 5,5 \text{ ГПа.}$$

Согласно табличным данным, модуль упругости Юнга для фторопласта составляет:  $E_p = 1 \dots 5$  ГПа.

## 9.11 Выводы по главе 9

Соотношения (9.9)... (9.14), а также (9.15)...(9.20) получены впервые и имеют огромное значение для экспериментального определения теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости материалов на образцах в форме призмы квадратного сечения, в стадии упорядоченного теплового режима, при симметричном нагреве или охлаждении.

Впервые получен новый и абсолютный метод неразрушающего контроля для определения ТФС материалов основанный на измерении только двух температур на поверхности призмы квадратного сечения — в центре грани и на середине ребра. Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра призмы квадратного сечения  $T_{ц.пр.}$  по формуле (9.10) при нагреве или (9.11) при охлаждении, не проникая с термопарой внутрь объема призмы и не нарушая ее целостность. При этом нет необходимости знать такие теплофизические характеристики вещества, как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и степень черноты.

Впервые установлено, что при достижении доли проникновения температурной волны в призме квадратного сечения  $\theta_T = 0,44$ , безразмерное волновое число  $N_T = 0,82$  и гарантирует стадию упорядоченного периода нагрева (охлаждения) с погрешностью 1 %, а число Фурье для призмы квадратного сечения в этой стадии нагрева или охлаждения составляет:  $Fo = 0,292$ .

Впервые разработана методика для определения скорости звука на образцах, выполненных в виде призмы квадратного сечения.

Для проведения опытов и для измерения температуры середины ребра и центра грани на призме квадратного сечения, возможно использование разработанного устройства с использованием контактных термопар.

Полученные в результате экспериментов ТЗФС бетона, красного и силикатного кирпича, оргстекла, фторопласта, согласуются с опубликованными в справочной и технической литературе данными и подтверждают точность метода, по температурным измерениям на поверхности образца.

Предлагаемая методика выгодно отличается от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью. Кроме того, методика позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому является перспективными для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов и технической теплофизики.

## ГЛАВА 10 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ТЕПЛООВОГО ПРОСЛУШИВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН В КУБЕ

---

### 10.1 Научно-методологические основы процесса нагрева куба

На основе исследований, авторами разработан новый абсолютный способ экспериментального определения ТФС методом неразрушающего контроля, а также теплового прослушивания и температурных волн, основанный на измерении температур и плотности теплового потока на поверхности образца в виде куба. Сущность экспериментального определения ТФС материалов заключается в том, что исследуемый образец в форме куба, помещают в нагревательную печь (рис. 9.1) или нагревательную установку.

После помещения исследуемого образца (куба) в печь и его нагрева контролируют изменение температуры на середине ребра и в центре грани куба, а также температуру окружающей среды для определения плотности теплового потока на поверхности куба при нагреве. При этом не требуется измерений коэффициента теплоотдачи и степени черноты системы.

Основы тепло-звуковой аналогии позволяют установить, что в результате интенсивного теплового воздействия на наружную поверхность куба и весь его объем, образовывается температурная волна, которая перемещается в глубину куба от поверхности к центру по всему объему вещества. В случае охлаждения на воздухе предварительно нагретого куба, температурная волна перемещается из глубины куба к поверхности.

Куб как фигура, в принципе образована пересечением трех неограниченных пластин. Причем, в виду симметричности нагрева (охлаждения) куба, температурная волна проходит расстояние равное только половине толщины условной пластины. Температурные волны при нагреве симметрично двигаются со всех сторон или граней куба к ее центру, а при охлаждении призмы — наоборот. Поэтому обоснованно считать, что при симметричном нагреве куба, можно использовать формулы для пластины, но с учетом безразмерного волнового числа в кубе.

Оценкой начала наступления упорядоченной части в кубе, согласно методике разд. 3.2, служит доля проникновения температурной волны (34):

$$\theta_T = (T_{Ц} - T_0)/(T_{ГР} - T_0), \quad (10.1)$$

где:  $T_{Ц}$ ,  $T_{ГР}$ ,  $T_0$  — соответственно температура центра куба, поверхности центра грани и начальная температура куба, °С.

Физический и математический эксперимент при симметричном нагреве куба, согласно (34 а), позволяет определить время ( $\tau_p$ ) в стадии упорядоченного теплового режима, при котором доля проникновения температурной волны составит:  $\theta_T = 0,5$ , а безразмерное волновое число при этом:  $H_T = 0,65$ , что гарантируют наступление упорядоченного периода нагрева в кубе с погрешностью в 1 %.

Используя полученные значения математического эксперимента: долю проникновения температурной волны  $\theta_T = 0,5$ , безразмерное волновое число  $H_T = 0,69$ , время нагрева  $\tau_p$ , волновое число температурной волны в отдельной пластине, определяется по формуле (29):

$$k_T^K = H_T / \delta_*, \text{ м}^{-1}, \quad (10.2)$$

где:  $\delta_*$  — расстояние между точками измерения температур центра куба и поверхности центра грани, то есть половину ширины грани куба, м.

Если известно расстояние  $\delta_*$ , между точками измерения температур: центра куба и поверхности центра грани, то при достижении доли проникновения температурной волны в кубе  $\theta_T = 0,5$ , безразмерное волновое число  $H_T = 0,69$ , что гарантируют стадию упорядоченного периода нагрева (охлаждения) с погрешностью 1 %.

Следовательно, в момент времени ( $\tau_p$ ), в стадии упорядоченного теплового режима, волновое число температурной волны в кубе  $k_T^K$ , образованной пересечением трех пластин, определится из соотношения:

$$k_T^K = 3 (H_T / \delta_*) = 3 (0,69 / \delta_*) = 2,07 / \delta_*, \text{ м}^{-1}. \quad (10.3)$$

Если говорить о методе неразрушающего контроля, то температуру центра куба (а возможно и для контроля) можно определить по поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра, не проникая с термопарой внутрь объема куба и не нарушая его целостность.

Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра куба  $T_{ц.к.}$  по формуле (35 а):

$$\text{— при нагреве: } T_{ц.к.} = T_{CP} - [(T_{CP} - T_{ГР})^2 / (T_{CP} - T_P)], \quad (10.4)$$

где:  $T_{CP}$ ,  $T_{ГР}$ ,  $T_P$  — соответственно температура среды нагрева, центра поверхности грани и середины ребра на поверхности.

Следовательно, при нагреве или охлаждении куба требуется измерять температуру только на ее поверхности: в центре грани и на середине ребра. В этом случае отпадает необходимость проникать с термопарой внутрь тела и разрушать образец, что в итоге позволяет определять ТФС исследуемого материала без нарушения целостности и эксплуатационных характеристик.

При нагреве куба, плотность теплового потока на поверхности куба  $q_{\text{ПР}}$ , зависит от температуры среды в экспериментальной установке  $T_{\text{СР}}$  и температуры куба в центре ее грани  $T_{\text{ГР}}$ .

Плотность теплового потока на поверхности куба  $q_{\text{ПР}}$  в процессе его нагрева, в момент времени ( $\tau_{\text{Р}}$ ), то есть в стадии упорядоченного теплового режима, определяется по формуле:

$$q_{\text{К}} = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2. \quad (10.5)$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_{\text{СР}} - T_{\text{ГР}}$ , °С,

Зависимость (9.12) используется когда температура воздуха внутри экспериментальной установки ( $T_{\text{СР}}$ ) изменяется от (+ 40) до (+ 100) °С, а температура грани на поверхности куба  $T_{\text{ГР}}$  изменяется от (+ 10) до (+ 30) °С.

Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{\text{ПР}}$  на поверхности куба, в момент времени ( $\tau_{\text{Р}}$ ) в стадии упорядоченного теплового режима, при нагреве, зависит от начальной температуры  $T_0$  и температуры поверхности центра грани  $T_{\text{ГР}}$  и определяется по формуле:

$$\vartheta_{\text{К}} = 0,5 (T_{\text{ГР}} - T_0), \text{ °С}. \quad (10.6)$$

Коэффициент теплоусвоения материала  $B_{\text{ПР}}$  куба, в момент времени ( $\tau_{\text{Р}}$ ), в стадии упорядоченного теплового режима, численно равен:

$$B_{\text{К}} = q_{\text{К}}/\vartheta_{\text{К}}, \text{ Вт/(м}^2\text{·К)}. \quad (10.7)$$

Теплопроводность куба в стадии упорядоченного теплового режима ( $\tau_{\text{Р}}$ ), согласно (55), определяется по формуле:

$$\lambda = B/1,414 k_{\text{T}}^{\text{К}} = 0,707 (B/k_{\text{T}}^{\text{К}}). \quad (10.8)$$

Объемная теплоемкость куба в режиме ( $\tau_{\text{Р}}$ ), согласно (48 б, 48 в):

$$(c_{\text{Р}}) = (B_{\text{К}})^2 \cdot (\tau_{\text{Р}})/(\pi \cdot \lambda). \quad (10.9)$$

Температуропроводность материала куба  $a$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), согласно (52 а), определяется по формуле:

$$a = \pi / [2\tau_{\text{Р}}(k_{\text{T}}^{\text{К}})^2], \text{ м}^2/\text{с}. \quad (10.10)$$

Соотношения (10.3), (10.8)... (10.10) получены впервые и имеют огромное значение для экспериментального определения теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости материалов на образцах в форме куба, в стадии упорядоченного теплового режима, при симметричном нагреве или охлаждении.

## 10.2 Методика DV экспериментального определения ТФС в кубе

Методика экспериментального определения ТФС материалов на образце — кубе сводится к последовательному выполнению следующих операций или действий: вначале предварительной подготовке и сбора информации, проведение эксперимента, а затем по результатам эксперимента расчет параметров ТФС материала куба.

Изготавливается образец — куб, взвешивается на весах и измеряется его масса  $m$  (кг), измеряются линейные размеры, по которым вычисляется объем ( $m^3$ ) и рассчитывается удельная плотность материала  $\rho = m/V$  (кг/ $m^3$ ). Для экспериментального определения ТФС материалов применялся нагрев куба в предварительно прогретой установке, когда она предварительно прогревается до определенной температуры (например 80...100 °С), а затем в нее помещается куб для проведения эксперимента.

В дальнейшем проводится запись соответствующих параметров:

$T_0$  — начальная температура куба, °С;

$T_{CP}$  — температура среды в установке, °С;

$T_{ГР}$  — температура центра грани на поверхности куба, °С;

$T_P$  — температура середины ребра на поверхности куба, °С;

$T_{Ц}$  — температура центра куба, °С;

$\tau$  — время процесса нагрева, с.

$\tau_p$  — время достижения доли проникновения температурной волны в кубе:  $\theta_T = 0,5$ .

Расчет соответствующих показателей ТФС материала куба, проводятся при доли проникновения температурной волны  $\theta_T = 0,5$  (время  $\tau_p$ ), что гарантируют стадию упорядоченного периода нагрева с погрешностью 1 %.

Расчет параметров ТФС проводится по следующему алгоритму.

1. Температура центра куба определяется по поверхностным измерениям температур центра грани и середины ребра, не проникая с термопарой внутрь объема куба и не нарушая его целостность.

Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра куба  $T_{Ц.к.}$  по формуле (10.4):

$$T_{Ц.к.} = T_{CP} - [(T_{CP} - T_{ГР})^2 / (T_{CP} - T_P)],$$

где:  $T_{CP}$ ,  $T_{ГР}$ ,  $T_P$  — соответственно температура среды (нагрева), центра поверхности грани, середины ребра на поверхности.

В отдельных экспериментах, для контроля и надежности научно методологических основ, температура центра куба замерялась термопарой.



2. Доля проникновения температурной волны при нагреве куба, согласно (10.1):

$$\theta_T = (T_{Ц} - T_0)/(T_{ГР} - T_0),$$

где:  $T_{Ц}$ ,  $T_{ГР}$ ,  $T_0$  — соответственно температура центра куба, поверхности центра грани и начальная температура, °С.

Выявляется время  $\tau_p$  достижения доли проникновения температурной волны в кубе  $\theta_T = 0,5$ , что соответствует безразмерному волновому числу  $H_T = 0,69$  и гарантирует стадию упорядоченного периода нагрева с погрешностью 1 %.

3. Волновое температурное число в кубе при  $\tau_p$ , согласно (10.3):

$$k_T^K = 3(H_T/\delta_*) = 3(0,69/\delta_*) = 2,07/\delta_*, \text{ м}^{-1}.$$

где:  $\delta_*$  — расстояние между точками измерения температур центра куба и поверхности центра грани, то есть половину ширины грани куба, м.

4. Плотность теплового потока на поверхности куба  $q_K$  в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (10.5):

$$q_K = 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333}, \text{ Вт/м}^2,$$

где:  $\Delta T$  — температурный напор:  $\Delta T = T_{СР} - T_{ГР}$ , °С.

5. Амплитуда колебаний температурной полуволны  $\vartheta_{ГР}$  на поверхности куба, в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (10.6):

$$\vartheta_K = 0,5 (T_{ГР} - T_0), \text{ °С}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения материала куба  $B_K$ , в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (10.7):

$$B_K = q_K/\vartheta_K, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (10.8):

$$\lambda = B_K/1,414 k_T^K = 0,707 (B/k_T^K).$$

8. Объемная теплоемкость в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (10.9):

$$(ср) = (B_K)^2 \cdot (\tau_p)/(\pi \cdot \lambda).$$

9. Температуропроводность, в момент времени ( $\tau_p$ ), согласно (10.10):

$$a = \pi / [2\tau_p(k_T^K)^2], \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Соответственно и ранее установлено, что теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), весовая (массовая) теплоемкость ( $c$ ) и плотность ( $\rho$ ) материала или вещества, связаны соотношениями: (7), (8), (9):

$$\lambda = a \cdot (c\rho), \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \quad a = \lambda/(c\rho), \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda/a, \text{ Дж}/(\text{м}^3\cdot\text{К}); \quad c = (c\rho)/\rho, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

### 10.3 Экспериментальное определение ТФС оргстекла

Для экспериментального исследования был изготовлен куб из блочного оргстекла (ГОСТ 17622). Нагрев куба из оргстекла проводился в предварительно прогретом шкафу, когда вначале установка без образца предварительно прогревается до определенной температуры, а затем в нее помещается куб.

На рис. 10.1 приведены экспериментальные распределения температур при нагреве куба из оргстекла, а также полученные на основе физического эксперимента в определенные промежутки времени  $\tau$ :  $\diamond$  — температура середины ребра ( $T_P$ );  $\square$  — температура центра грани ( $T_{TP}$ );  $\triangle$  — температура центра куба ( $T_{Ц}$ ). Начальная температура куба составляла:  $T_0 = 24^\circ\text{C}$ , а температура среды в печи:  $T_{CP} = 96^\circ\text{C}$ . Удельная плотность куба из оргстекла:  $\rho = 1180 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Ширина грани:  $2\delta = 90 \text{ мм}$ .

Также, на рис. 10.1 и в табл. 10.1 приведены значения температуры центра куба  $T_{Ц,к}$ , рассчитанные по формуле теплового прослушивания (10.4). Расхождения температур центра куба, полученные экспериментально и рассчитанные по формуле теплового прослушивания не превышают 3 %, что практически подтверждает определение температур в центре куба по измерениям температур на поверхности без нарушения целостности образца. Кроме того, в табл. 10.1 приведены значения доли проникновения температурной волны в кубе  $\theta_T$ , рассчитанные по формуле (10.1).

Согласно методике DV экспериментального определения ТФС материалов вычисляются следующие показатели.

1. Расчеты (табл. 10.1) показывают, что время достижения доли проникновения температурной волны в центре куба при его симметричном нагреве ( $\theta_T = 0,5$ ), составляет:  $\tau_p = 100 \text{ мин} = 6000 \text{ с}$ .

2. Волновое температурное число при  $\tau_p$ , согласно (10.3):

$$k_T^K = 2,07/\delta_* = 2,07/0,044 = 47 \text{ м}^{-1}.$$

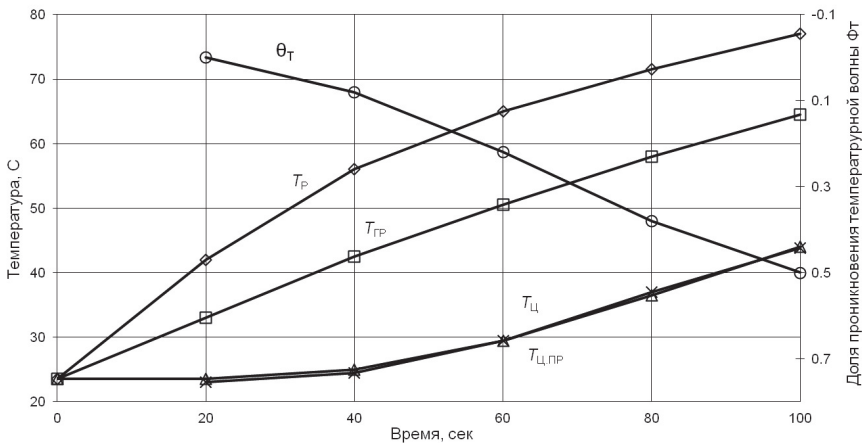


Рис. 10.1 Нагрев куба из оргстекла:  $2\delta = 90$  мм,  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>:

- ◇ — температура середины ребра  $T_p$ ;
- — температура центра грани  $T_{gp}$ ;
- △ — температура центра куба  $T_{ц}$ ;
- × — температура центра куба  $T_{ц,к}$ , рассчитанная по формуле (10.4)
- — доля проникновения температурной волны в кубе  $\theta_T$  (ф-ла 10.1)

Таблица 10.1 Экспериментальные и расчетные значения температур при симметричном нагреве куба из оргстекла, шириной грани  $2\delta = 90$  мм, удельной плотностью 1180 кг/м<sup>3</sup>:

Время, мин.	Экспериментальные значения температур: середины ребра на поверхности — $T_p$ , центра поверхности грани — $T_{gp}$ , центра куба — $T_{ц}$			Расчетная температура центра куба	Доля проникновения температурной волны
	$T_p$	$T_{gp}$	$T_{ц}$	$T_{ц,к}$	$\theta_T$
0	23,5	23,5	23,5	—	—
20	42	33	23,5	23	0,08
40	56	42,5	25	24,5	0,22
60	65	50,5	29,5	29,2	0,38
80	71,5	58	36,5	37	0,5
100	77	64,5	44	43,8	0,5

3. Температурный напор  $\Delta T$  на поверхности куба, при симметричном нагреве, при ( $\tau_p$ ), согласно (10.5):

$$\Delta T = T_{CP} - T_{TP} = 96 - 64,5 = 31,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Плотность теплового потока на поверхности призмы  $q_{\text{ПР}}$  в процессе симметричного нагрева, при ( $\tau_p$ ), согласно (10.5):

$$\begin{aligned} q_K &= 4,6 \cdot \Delta T + 0,035(\Delta T)^2 + (\Delta T)^{1,333} = \\ &= 4,6(31,5) + 0,035(31,5)^2 + (31,5)^{1,333} = 145 + 35 + 99 = 280 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

5. Амплитуда колебаний температурной полутолщины  $\vartheta_{\text{ПР}}$  на поверхности призмы, при ( $\tau_p$ ), согласно (10.6):

$$\vartheta_K = 0,5 (T_{TP} - T_0) = 0,5 (64,5 - 23,5) = 0,5 \cdot 41 = 20,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

6. Коэффициент теплоусвоения куба  $B_K$ , при ( $\tau_p$ ), согласно (10.7):

$$B_K = q_K / \vartheta_K = 280 / 20,5 = 13,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

7. Теплопроводность при ( $\tau_p$ ), согласно (10.8):

$$\lambda = B_K / 1,414 k_T^K = 0,707 (B / k_T^K) = 0,707 (13,7 / 47) = 0,205 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

8. Объемная теплоемкость при ( $\tau_p$ ), согласно (10.9):

$$(c\rho) = (B_K)^2 \cdot (\tau_p) / (\pi \cdot \lambda) = (13,7)^2 \cdot (6000) / (3,14 \cdot 0,205) = 1750 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

9. Температуропроводность, при ( $\tau_p$ ), согласно (10.10):

$$a = \pi / [2\tau_p (k_T^K)^2] = 3,14 / [2 \cdot 6000 \cdot (47)^2] = 0,118 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

10. Число Фурье:  $Fo = (a \cdot \tau_p) / \delta^2 = (6000 \cdot 0,118 \cdot 10^{-6}) / (0,045)^2 = 0,356$ .

11. Теплопроводность  $\lambda$ , температуропроводность  $a$ , объемная теплоемкость ( $c\rho$ ), массовая теплоемкость ( $c$ ) и плотность ( $\rho$ ) для блочного оргстекла, связаны соотношениями:

$$\lambda = a \cdot (c\rho) = 1750000 \cdot 0,118 \cdot 10^{-6} = 0,206 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$a = \lambda / (c\rho) = 0,205 / 1750000 = 0,117 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с};$$

$$(c\rho) = \lambda / a, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)} = 0,205 / 0,118 \cdot 10^{-6} = 1740000 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$c = (c\rho) / \rho = 1750000 / 1180 = 1483 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Погрешность экспериментального определения ТФС блочного оргстекла на образцах в виде куба не превышает 1 %.

## 10.4 Методика DV определения тепло-звукофизических свойств в кубе

Методика DV экспериментального определения скорости звука твердых строительных, теплоизоляционных, композиционных материалов и изделий на образце — куб, сводится в продолжении или последующему расчету ТФС материала призмы полученных экспериментально. Куб как фигура, в принципе образована пересечением трех неограниченных пластин, и соответственно тепловому воздействию с шести граней одновременно. В виду симметрии используется половина ширины грани куба —  $\delta_*$ .

1. Поверхностная плотность куба:

$$\rho_{\Pi} = 0,332 (\rho \cdot \delta_*), \text{ (кг/м}^2\text{)}. \quad (10.11)$$

2. Поверхностная скорость температурной волны в кубе:

$$S_{\Pi} = 3 (a/\delta_*), \text{ м/с}. \quad (10.12)$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна теплопроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м}$  (м/с).

Скорость температурной волны  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^*$ .

3. Термическое напряжение на поверхности куба  $\psi_{\Pi}^{\text{куб}}$ , обратно пропорционально шестой части (0,1667) термического сопротивления теплопроводности пластины  $R_{\Pi\text{Л}}$ :

$$\psi_{\Pi}^{\text{куб}} = 1/(0,1667 \cdot R_{\Pi\text{Л}}) = 6/R_{\Pi\text{Л}} = 6/(\delta_*/\lambda) = 6(\lambda/\delta_*), \text{ (Па} \cdot \text{м)}. \quad (10.13)$$

Термическое сопротивление теплопроводности пластины  $R_{\Pi\text{Л}}$  постоянная характеристика материала:  $R_{\Pi\text{Л}} = \delta/\lambda$ , (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

4. Безразмерное число волновой скорости в кубе  $\Phi_{\text{К}}$ :

$$\Phi_{\text{К}} = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{\text{куб}}). \quad (10.14)$$

5. Звуковая (акустическая) скорость материала куба:

$$C_{\text{А}} = S_{\Pi}^*/\Phi_{\text{К}}, \text{ м/с}, \quad (10.15)$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна теплопроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м}$ .

6. Модуль упругости Юнга:

$$E_{\text{р}} = C_{\text{А}}^2 \cdot \rho, \text{ ГПа}. \quad (10.16)$$

## 10.5 Экспериментальное определение тепло-звукофизических свойств в кубе из оргстекла

Ширина грани куба  $2\delta = 90$  мм ( $\delta_* = 0,045$  м), удельная плотность оргстекла  $\rho = 1180$  кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность  $\lambda = 0,202$  Вт/(м·К); температуропроводность  $a = 0,121 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с.

1. Поверхностная плотность призмы, согласно (10.11):

$$\rho_{\Pi} = 0,332 (\rho \cdot \delta_*) = 0,332 (1180 \cdot 0,045) = 17,63 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

2. Поверхностная скорость температурной волны согласно (10.12):

$$S_{\Pi} = 3 (a/\delta_*) = 3 (0,121 \cdot 10^{-6}/0,045) = 8,06 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}.$$

Скорость температурной волны  $S_{\Pi}^*$ , на глубине 1 м, численно пропорциональна температуропроводности материала:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,121 \cdot 10^{-6}$  м/с.

Скорость температурной волны на поверхности куба  $S_{\Pi} > S_{\Pi}^*$  в  $n$  раз:  $n = S_{\Pi}/S_{\Pi}^* = 8,06/0,121 = 66,6$ .

3. Термическое напряжение на поверхности куба, согласно (10.13):

$$\psi_{\Pi}^{\text{пр}} = 6 (\lambda/\delta_*) = 6 (0,202/0,045) = 26,9 \text{ (Па} \cdot \text{м)}.$$

4. Безразмерное число волновой скорости призмы  $\Phi_K$ , согласно (10.14):

$$\Phi_K = S_{\Pi}^2 (\rho_{\Pi}/\psi_{\Pi}^{\text{пр}}) = (8,06 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (17,63)/26,9 = 42,7 \cdot 10^{-12}.$$

5. Звуковая (акустическая) скорость материала призмы, в пределах экспериментальных температур, согласно (10.15):

$$C_A = S_{\Pi}^*/\Phi_K = 0,121 \cdot 10^{-6}/42,7 \cdot 10^{-12} = 2834 \text{ м/с},$$

где  $S_{\Pi}^*$  (м/с) — поверхностная скорость плоской температурной волны на глубине  $\delta = 1$  м, и численно пропорциональна температуропроводности материала (вещества)  $a$ , то есть:  $S_{\Pi}^* = a/1\text{м} = 0,121 \cdot 10^{-6}$ , м/с.

Согласно табличным данным [3], для оргстекла (плексиглас), скорость звука составляет  $C_A = 2820$  м/с; по другим источникам  $C_A = 2680$  м/с. То есть расхождение по скорости звука составляет 1 %.

6. Модуль упругости Юнга, согласно (10.16):

$$E_p = C_A^2 \cdot \rho = (2834)^2 \cdot 1180 = 9,48 \text{ ГПа}.$$

Согласно табличным данным, модуль упругости Юнга для оргстекла составляет:  $E_p = 5...9$  ГПа.

## 10.6 Выводы по главе 10

Соотношения (10.3)... (10.5), а также (10.11)...(10.13) получены впервые и имеют огромное значение для экспериментального определения теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости материалов на образцах в форме куба, в стадии упорядоченного теплового режима, при симметричном нагреве или охлаждении.

Впервые получен новый и абсолютный метод неразрушающего контроля для определения ТФС материалов основанный на измерении только двух температур на поверхности куба: в центре грани и на середине ребра. Тепловое прослушивание позволяет определять температуру центра при нагреве куба  $T_{ц,к}$  по формуле (10.4), не проникая с термопарой внутрь объема куба и не нарушая его целостности. При этом нет необходимости знать такие теплофизические характеристики вещества, как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и степень черноты.

Впервые установлено, что при достижении доли проникновения температурной волны в кубе  $\theta_T = 0,5$ , безразмерное волновое число  $H_T = 0,69$  и гарантирует стадию упорядоченного периода нагрева (охлаждения) с погрешностью 1 %, а число Фурье для куба в этой стадии нагрева или охлаждения составляет:  $Fo = 0,356$ .

Впервые разработана методика для определения тепло-звукофизических свойств и скорости звука на образцах, выполненных в виде куба. Полученные в результате экспериментов ТЗФС оргстекла, согласуются с опубликованными в справочной и технической литературе данными и подтверждают точность метода, по температурным измерениям на поверхности образца — куба.

Предлагаемая методика выгодно отличается от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью. Кроме того, методика позволяет легко автоматизировать теплофизический эксперимент, упрощается реализация на базе микропроцессорной техники, и поэтому является перспективными для использования в информационно-измерительных системах неразрушающего контроля ТФХ материалов и технической теплофизики.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Впервые разработаны основы тепло-звуковой аналогии, которые позволяют определять ТЗФС материалов и изделий. С помощью несложных математических зависимостей адекватно описана теплофизика процессов нагрева и охлаждения в телах различной формы (пластина, призма квадратного сечения, куб), а также в ограждениях зданий и сооружений. Температурное поле, определяемое из решения краевых задач теплопроводности, для соответствующих тепловых воздействий и условий проведения теплофизического эксперимента, позволяет определять не только теплофизические, но и звукофизические свойства различных тел и материалов. Разработаны методики позволяющие получить наиболее полную и многомерную информацию ТЗФС исследуемых материалов и изделий.

В работе впервые вводятся формулы, определения и понятия: поверхностная плотность изделия, поверхностная скорость плоской температурной волны, плотность энергии вещества, термическое напряжение, безразмерное число волновой скорости, теплопроводность, термоизоляция (в отличие от теплоизоляции), а также эргономические характеристики по уровню температурного ощущения и болевого порога. В работе впервые сформулирован закон температурной волны, закон температурного ощущения, а также скорректированный физический смысл теплопроводности вещества (материала).

Математический и физический эксперимент по тепло-звуковой аналогии позволит значительно модернизировать в лучшую сторону экспериментальные установки, устройства и приборы, повысить их технические характеристики, совершенствовать алгоритм расчетов ТЗФС материалов и изделий, более современно взглянуть на физический эксперимент и физический смысл отдельных коэффициентов и параметров. Тепло-звуковая аналогия, её новые понятия и параметры позволят упростить и ускорить экспериментальное определение ТЗФС тел сложной конфигурации и формы. Разработанные методы выгодно отличаются от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью, обладают новизной и оригинальностью.

Монография по тепло-звуковой аналогии предназначена для научных исследований в теплофизике, математическом и физическом эксперименте, расчетов тепло-звукофизических (ТЗФС) свойств различных строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов (веществ) и изделий, а также твердых материалов и металлов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы теории теплопроводности. I и 2-я ч. М. Высшая школа. 1982. 671 с.
2. Беранек Л. Акустические измерения М.:ИИЛ. 1952.
3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. М.: Стройиздат. 1982.
4. Бойков Г.П., Видин Ю.В., Журавлев В.Н., Колосов В.В. Основы тепломассообмена. Красноярск, 2000. 272 с.
5. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
6. Волькенштейн В.С. Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов. Л.: Энергия. 1971. 145 с.
7. Видин Ю. В. Инженерные методы расчетов процессов теплопереноса. Красноярск, 1974. 144 с.
8. Видин Ю. В. Иванов В. В. Расчет температурных полей в твердых телах, нагреваемых конвекцией и радиацией одновременно / Красноярск, 1965. 95 с.
9. Герашенко О. А., Гордов А. Н., Лах В. И. Температурные измерения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1984. 496 с.
10. Гордов А. Н., Малков Я. В., Эргардт Н. Н. Точность контактных методов измерения температуры. М.: Изд-во стандартов, 1976. 232 с.
11. ГОСТ 15116–69. Звукоизоляция. Метод измерения. Показатель звукоизоляции.
12. ГОСТ 8.009–72. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
13. ГОСТ 20445–75. Методы измерений шумов на рабочих местах.
14. ГОСТ 8.157–75. Государственная система обеспечения единства измерений. Шкалы температурные практические.
15. ГОСТ Р 51337–99 Тепловая инерция. «Температуры касаемых поверхностей. Эргономические данные для установления предельных величин горячих поверхностей». М. 2000. 16 с.
16. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 287с.
17. Епифанов Г.И.. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 1977.
18. Данилов Н. Д. Способ определения теплофизических характеристик материалов. Авт. св. СССР № 293209.
19. Дмитриевич А. Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов. М. — Л.: Госстройиздат, 1963, 204 с.

20. Дроздов В.А., Савин В.К., Александров Ю.П. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях. – М.: Стройиздат, 1979. – 506 с.
21. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 108 с.
22. Зарубин В. С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.
23. Иванов В.В. Карасева Л.В., Тихомиров С.А. Нестационарный теплоперенос в многослойных строительных конструкциях. // Известия вузов. Строительство. – 2001. №9–10. С. 7–10.
24. Иванов В.В., Карасева Л.В., Сохно И.И.. Исследование процессов радиационно-конвективного прогрева ограждающих конструкций. // Известия вузов Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2003. №3.
25. Иванов В.В., Карасева Л.В., Сохно И.И.. Температурные режимы ограждающих конструкций. // Жилищное строительство. 2003. №5. С. 17–18.
26. Иофе В. К., Корольков В. Г., Сапожков М. А. Справочник по акустике. Под редакцией Сапожкова М. А. М.: Издательство «Связь». 1979. 312 с.
27. Исаченко В.П., Осипова В.П., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
28. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. - 408 с.
29. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
30. Кириченко Ю. А. Измерение температуропроводности методом радиальных температурных волн в цилиндре // Измерительная техника, 1960, № 5. с. 29 — 32.
31. Кнудсен В. О. Архитектурная акустика. Х.—К.:ОНТИ. 1936.
32. Ковылин А. В., Фокин В. М. Методика определения коэффициентов теплопроводности, теплоусвоения, тепловой инерции, температуропроводности и объемной теплоемкости строительных и теплоизоляционных материалов методом неразрушающего контроля //Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. Вып.19 (38). С. 112–117.
33. Коротков П. А., Лондон Г. Е. Динамические контактные измерения тепловых величин. Л.: Машиностроение, 1974. 224 с.
34. Крейт О., Блек У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. 256 с.
35. Кузнецов Н. Д., Чистяков В. С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. М.: Энергия, 1978. 215 с.
36. Куинн Т. Температура / Пер, с англ. М.:Мир, 1985. 448 с.
37. Кулаков М. В., Макаров Б. И. Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979. 96 с.

38. Курепин В. В., Дикалов А. И. Определение теплофизических характеристик методом мгновенного теплового импульса при учете влияния контактных термических сопротивлений // ИФЖ. 1981. Т. 40, № 6. С. 1046.

39. Курепин В. В., Козин В. М., Левочкин Ю. В. Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4, № 3. С. 91.

40. Курепин В. В., Платунов Е. С., Белов Е. А. Энтальпийный термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Промышленная теплотехника. 1982. № 4. С. 78.

41. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, Наука, 1970. 659 с.

42. Куталадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

43. Лепилов В.И., Карапузова Н.Ю., Ковылин А.В., Попова А.В., Усадский Д.Г. Теоретические основы определения теплофизических свойств материалов и тепломассообменных процессов в ограждениях: Уч. пособие. Издательство ВолгГАСУ, Волгоград. 2015. 113 с.

44. Ли, Тейлор. Температуропроводность материала с диспергированными включениями // Теплопередача. Труды американского общества инженеров-механиков. 1978. № 4. С. 177 — 182.

45. Литовский Е. Я., Пучкелевич Н. А. Теплофизические свойства огнеупоров: Справочник. М.: Металлургия, 1982. 152 с.

46. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

47. Лыков А. В. Тепломассообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978. 480с.

48. Лыков А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск, Наука и техника, 1961. 519 с.

49. Мак Адамс В. Х. Теплопередача. М.: Металлургия, 1961. 686 с.

50. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под редакцией А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1973. 336 с.

51. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973. 319 с.

52. Мецик М. С. Методы обработки экспериментальных данных и планирование эксперимента по физике. Иркутск: Иркутский государственный университет. 1981. 111 с.

53. Низовцев М.И., Терехов В.И., Хайритдинов И.К. Межрамные экраны и жалюзи с теплоотражающими покрытиями. // Светопрозрачные конструкции. – 2005. - №2.

54. Никитенко Н.И. Теория тепло- и массопереноса. – Киев: Наукова думка, 1983. – 349 с.
55. Новицкий Л. А., Кожевников И. Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение, 1975. 216 с.
56. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 301 с.
57. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. М.: Энергия, 1979. 319 с.
58. Ойков Г., Буриев В. Исследование влияния ультразвука на теплофизические коэффициенты // Теплофизика и теплотехника. 1970. № 16. Киев: Наукова думка. С. 25 — 26.
59. Пак М. И., Осипова В. А. Квазистационарный метод комплексного определения теплофизических свойств твердых тел в широком температурном интервале // Теплоэнергетика, 1967, № 6. С. 73 — 76.
60. Паперный Е. А., Эйдельштейн И. Л. Погрешности контактных методов измерения температур. М. — Л.: Энергия, 1966.
61. Парцхаладзе К. Г. Импульсный метод измерения температуропроводности // Труды метрологических институтов СССР. 1971. В. I29. С. 86.
62. Патент РФ № 2250454. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик твердых материалов / Фокин В. М., Чернышов В. Н., Бойков Г. П.. Заявл. 12.04.2004; Опубл. 20.04.2005.
63. Патент РФ № 2263901. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / Фокин В. М., Чернышов В. Н.. Заявл. 25.05.2004; Опубл. 10.11.2005.
64. Патент РФ № 2421711. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / Фокин В. М., Ковылин А. В. Заявл. 29.07.2009. МПК<sup>8</sup> G 01 N 25/18.
65. Патент РФ № 2530441. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установка для его осуществления / Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Заявл. 09.07.2013. МПК G 01 N 25/18.
66. Петрунин Г. И., Юрчак Р. П. Установка для измерения температуропроводности материалов методом плоских температурных волн // Техника высоких температур. 1971. Т. 9, № 3. С. 622 — 626.
67. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.

68. Платунов Е. С., Буравой С. Е., Курепин В. В. и др. Теплофизические измерения и приборы / Под ред. Е. С. Платунова. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.
69. Платунов Е. С., Козин В. М., Левочкин Ю.В. Цифровой экспресс-измеритель теплофизических свойств вещества // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4, № 1. С. 51 — 65.
70. Платунов Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме. Л.: Энергия, 1973. 143 с.
71. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
72. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия. 1978. 262 с.
73. Савватимский А. И. Экспериментальное определение физических свойств веществ при микросекундном нагреве импульсом электрического тока. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1999.
74. Сергеев О. А. Метрологические основы теплофизических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1972, 170 с.
75. Сперроу Э. М., Сесс Р. Д. Теплообмен излучением. Л.: Энергия, 1971. 294 с.
76. СНиП II-3-79\* Строительная теплофизика. М.: Стройиздат, 1996.
77. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. М.: ФГУП ЦПП, 2004.
78. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2004.
79. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен / Под ред. проф. Э.И. Гуйго. М.: Агропромиздат, 1986. 320 с.
80. Теория теплообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 567 с.
81. Теплотехника. Под ред. Луканина В.Н. М.: Высшая школа, 2002.
82. Тепло и теплообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
83. Теплотехнический справочник. Т. 2. / Под общей ред. В. И. Юренева и П. Д. Лебедева. М.: Энергия, 1975. 896 с.
84. Теплофизические свойства веществ / Под ред. Н. Б. Варгафтика. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. 367 с.
85. Теплопроводность твердых тел: Справочник / А. С. Охотин, Р. П. Боровикова Т. В. Нечаева и др.; Под ред. А. С. Охотина. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
86. Термоэлектрический измеритель теплового потока / Налетов В. Л., Дивин Н. П., Зайцев А. С. // Приборы и техн. эксперим. 1990. № 5. С. 248.

87. Тихомиров С.А. Исследование динамики процессов теплопереноса через ограждающие конструкции. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Ростов-на-Дону. 2004.
88. Томилина Е.А., Ахметьев М.А., Коллычев А.Д. Теплоотражающие пленки в светопропускающих покрытиях. // Известия вузов. Строительство. 2004. № 2. С. 119–123.
89. Фандеев Е. И., Ушаков В. Г., Луцаев Г. А. Непогружаемые термодетекторы. М.: Энергия, 1979. 64 с.
90. Фокин В. М. Определение температуропроводности строительных материалов: Монография. Волгоград: Издательство ВолгАСА. 2002. 127 с.
91. Фокин В. М., Бойков Г. П., Видин Ю. В. Основы технической теплофизики: Монография. М.: Издательство «Машиностроение-1». 2004. 172 с.
92. Фокин В. М., Чернышов В. Н. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов: Монография. М.: Машиностроение-1, 2004. 212 с.
93. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы энергосбережения в вопросах теплообмена: Монография М.: Машиностроение-1», 2005. 193 с.
94. Фокин В. М. Ковылин А. В., Чернышов В. Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий: Монография. М.: «Спектр». 2011. 156 с.
95. Фокин В. М., Ковылин А. В., Усадский Д. Г. Стеклопакеты и их теплофизические свойства: Монография. Санкт-Петербург: «Научно-техническое издательство». 2017. 132 с.
96. Фокин В. М., Ковылин А. В., Усадский Д. Г., Попова А. В. Теплофизические свойства светопрозрачных конструкций: Монография. Санкт-Петербург-Москва-Краснодар: «Лань». 2018. 96 с.
97. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256с.
98. Филиппов Л. П. Измерения теплофизических свойств веществ методом периодического нагрева. М.: Энергоатомиздат, 1984.
99. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 232 с.
100. Франчук А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. М.: Госстрой СССР, НИИ Стройфизики, 1969. 128 с.
101. Харламов А. Г. Измерение теплопроводности твердых тел. М.: Атомиздат, 1973. 151 с.

102. Хуторной А.Н., Цветкова Н.А., Кузин А.Я. Теплозащитные свойства неоднородных наружных стен зданий: Монография. Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2006. – 287 с.
103. Чернышов В. Н., Фокин В. М., Усадский Д.Г., Ковылин А. В. Методы и средства экспериментального определения теплозащитных характеристик строительных материалов и конструкций. Монография. Санкт-Петербург: Издательство «Экспертные решения». 2017. 320 с.
104. Чернышова Т. И., Чернышов В. Н. Методы и средства контроля теплофизических свойств материалов. М.: Издательство «Машиностроение». 2001. 240 с.
105. Черпаков П. В. Теория регулярного теплообмена. М.: Энергия, 1975. 225 с.
106. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов. М.: Машгиз, 1962. 247 с.
107. Чеховский В. Я., Беляев, Ю. В., Вавилов Р. А. Установка для измерения тепло- и температуропроводности твердых материалов //ИФЖ. 1972. Т. 22, № 6. С. 1049.
108. Чистяков С. Ф., Радун Д. Б. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Высшая школа, 1972. 392 с.
109. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
110. Чуриков А. А. Разработка и исследование методов и устройств для автоматического неразрушающего контроля температурозависимых теплофизических свойств твердых теплозащитных материалов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. 1980. 16 с.
111. Шашков А. Г. Системно-структурный анализ процесса теплообмена и его применение. М.: Энергоатомиздат, 1983. 280 с.
112. Шевельков В. А. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. М. 1958. 96 с.
113. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972. 381 с.
114. Шлыков Ю. П., Ганин Е. А., Царевский С. Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.
115. Шорин С. Н. Теплопередача. М.: Высшая школа, 1964. 490 с.
116. Эккерт Э. Р., Дрейк Р. М. Теория тепло- и массообмена. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961. 680 с.
117. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

---

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ .....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	10
ГЛАВА 1 ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ .....	13
1.1 Обзор методов теплообмена и тепловых режимов.....	13
1.2 Обзор методов определения ТФС материалов.....	16
1.2.1 Метод регулярного теплового режима .....	16
1.2.2 Метод квазистационарного теплового режима.....	18
1.2.3 Метод монотонного теплового режима.....	19
1.2.4 Методы теплового импульса или мгновенного источника .....	21
1.2.5 Методы температурных волн.....	23
1.2.6 Комплексные методы.....	25
1.2.7 Анализ методов теплообмена и расчета ТФС материалов .....	28
простые формулы; быстрота проведения опыта.....	29
1.3 Обзор методов измерений звукофизических параметров.....	30
1.3.1 Измерительная аппаратура и оборудование.....	30
1.3.2 Методы измерения звукофизических параметров.....	31
1.4 Электротепловая аналогия .....	32
1.5 Выводы по главе 1.....	35
ГЛАВА 2 АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ.....	37
2.1 Актуальность исследования звукофизических свойств.....	37
2.2. Основные характеристики, определения и понятия.....	38
2.3 Звукофизические свойства твердых тел .....	44
2.4 Методика средних значений .....	46
2.5 Выводы по главе 2.....	47
ГЛАВА 3 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ПОНЯТИЯ И ПРАВИЛА ТЕПЛО-ЗВУКОВОЙ АНАЛОГИИ.....	48
3.1 Основные положения и теоретические основы .....	48
3.2 Доля проникновения температурных и звуковых волн .....	59
3.3 Тепловое прослушивание тел и оценка наступления упорядоченного теплового режима.....	65
3.4 Звукопроводность и теплопроводность. Звукоизоляция и термоизоляция .....	68



3.5 Плотность теплового потока на поверхности тел, волновое число, коэффициент теплоусвоения.....	71
3.6 Тепловое давление и термическое напряжение .....	85
3.7 Поверхностная плотность материалов и изделий.....	90
3.8 Поверхностная скорость плоской температурной волны .....	92
3.9 Плотность тепловой и акустической энергии .....	97
3.10 Закон температурной волны. Безразмерное число волновой скорости.....	98
3.11 Длина свободного пробега фонона .....	99
3.12 Тепловая инерция и тепловая активность .....	100
3.13 Тепло-звуковая аналогия и модуль упругости Юнга .....	102
3.14 Общие выводы по главе 3.....	102
<b>ГЛАВА 4 ЗАКОН ТЕМПЕРАТУРНОГО ОЩУЩЕНИЯ И ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....</b>	<b>109</b>
4.1 Тепло-звуковая аналогия и основы температурного ощущения.....	109
4.2 Задачи и правила определения температурного ощущения .....	113
4.3 Примеры определения температурного ощущения человека .....	115
4.4 Выводы по главе 4.....	120
<b>ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО-ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН.....</b>	<b>123</b>
5.1 Устройство и работа измерителя тепло-звукофизических свойств материалов (FOKUS) на образце в виде пластины .....	123
5.2 Методика VA экспериментального определения ТЗФС материалов на образце — пластине в установке FOKUS .....	128
5.3 Физический эксперимент тепло-звуковой аналогии .....	135
5.3.1 Теплофизический эксперимент пластины из текстолита.....	135
5.3.2 Теплофизический эксперимент пластины из фторопласта.....	143
5.3.3 Теплофизический эксперимент пластины из оргстекла.....	150
5.4 Выводы по главе 5.....	158
<b>ГЛАВА 6 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО-ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ МЕТОДОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН.....</b>	<b>159</b>
6.1 Температуры и тепловые потоки в ограждениях зданий.....	159
6.2 Методика экспериментального определения ТЗФС ограждений зданий методом температурных волн .....	164
6.3 Определение ТЗФС ограждения здания из силикатного кирпича .....	170
6.4 Выводы по главе 6.....	174

ГЛАВА 7 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО- ЗВУКОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ОТРАЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЛНЫ.....	176
7.1 Особенности отражения температурной волны .....	176
7.2 Устройство и работа измерителя тепло-звукофизических свойств материалов Fokus-M нестационарным методом .....	179
7.3 Методика VM экспериментального определения ТЗФС материалов в установке Fokus-M и Fokus-1 .....	180
7.4 Теплофизический эксперимент пластины из текстолита .....	182
7.5 Теплофизический эксперимент пластины из оргстекла .....	186
7.6 Выводы по главе 7.....	190
ГЛАВА 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА МЕТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОЗВУКОВОЙ АНАЛОГИИ .....	191
8.1 Математический эксперимент определения скорости звука металлов по теплофизическим свойствам .....	191
8.2 Численное определение скорости звука металлов .....	193
8.3 Выводы по главе 8.....	193
ГЛАВА 9 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕПЛООВОГО ПРОСЛУШИВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН В ПРИЗМЕ КВАДРАТНОГО СЕЧЕНИЯ.....	194
9.1 Научно-методологические основы процесса симметричного нагрева призмы квадратного сечения .....	194
9.2 Методика DV экспериментального определения ТФС материалов в призме квадратного сечения .....	201
9.3 Экспериментальное определение ТФС жаростойкого бетона .....	206
9.4 Экспериментальное определение ТФС красного кирпича .....	212
9.5 Экспериментальное определение ТФС силикатного кирпича .....	215
9.6 Экспериментальное определение ТФС оргстекла .....	217
9.7 Экспериментальное определение ТФС фторопласта .....	224
9.8 Экспериментальное определение ТФС оргстекла в вакууме .....	229
9.9 Методика DV определения тепло-звукофизических свойств, в призме квадратного сечения .....	233
9.10 Экспериментальное определение тепло-звукофизических свойств, в призме квадратного сечения .....	234
9.11 Выводы по главе 9.....	239
ГЛАВА 10 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ТЕПЛООВОГО ПРОСЛУШИВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЛН В КУБЕ ....	240

10.1 Научно-методологические основы процесса нагрева куба.....	240
10.2 Методика DV экспериментального определения ТФС в кубе .....	243
10.3 Экспериментальное определение ТФС оргстекла .....	245
10.4 Методика DV определения тепло-звукофизических свойств в кубе .	248
10.5 Экспериментальное определение тепло-звукофизических свойств в кубе из оргстекла .....	249
10.6 Выводы по главе 10.....	250
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	251
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	252

Научное издание

**Фокин** Владимир Михайлович

**Ковылин** Андрей Васильевич

**Усадский** Денис Геннадиевич

**ТЕПЛОЗВУКОВАЯ АНАЛОГИЯ**

Монография

Под редакцией доктора наук В. М. Фокина

Подписано к печати 06.03.2023.

Формат 60×84/16

Бумага офсетная. Печать офсетная

Объем 16,5 печ.л. Тираж 500 экз.

Издательство «Наукоемкие технологии»

ООО «Корпорация «Интел Групп»

<https://publishing.intelgr.com>

E-mail: [publishing@intelgr.com](mailto:publishing@intelgr.com)

Тел.: +7 (812) 945-50-63

ISBN 978-5-907618-48-0



9 785907 618480 >