

А. А. КУДИНОВ  
С. К. ЗИГАНШИНА

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ И СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THERMAL INSULATION PARAMETERS  
ON THE EFFECTIVENESS OF ENCLOSING STRUCTURES  
AND BUILDING HEATING SYSTEMS

Представлены результаты теплотехнических расчетов наружных многослойных ограждающих конструкций зданий и тепловой мощности системы отопления помещений жилого здания, включающие расчеты температурных полей и парциальных давлений водяного пара при различных параметрах конструктивных слоев и слоев тепловой изоляции. Рассмотрены варианты и дана оценка варьирования параметров и различного расположения тепловой изоляции в наружных многослойных ограждениях на изменения полей температур и парциальных давлений водяного пара в ограждении, а также на изменение тепловой мощности системы отопления помещений здания для двух климатологических районов проектирования. Расчеты выполнялись по представленной в статье методике с применением специально разработанной программы для ЭВМ.

**Ключевые слова:** здания, ограждающие конструкции, тепловая изоляция, теплотехнический расчет, сопротивление теплопередаче, температурное поле, диффузия водяных паров, точка росы, система отопления, тепловая мощность

**Введение.** В настоящее время основными задачами в области строительства являются проектирование отапливаемых зданий и оборудования объектов энергетики с эффективным использованием энергоресурсов, а также модернизация существующего фонда зданий в целях экономии тепловой энергии. При проектирова-

The results of thermal engineering calculations of external multilayer enclosing structures of buildings and the thermal power of the heating system of residential buildings are presented, including calculations of temperature fields and partial pressures of water vapor at various parameters of structural layers and thermal insulation layers. Variants are considered and an assessment is given of the variation of parameters and the different location of thermal insulation in external multilayer fences for changes in temperature fields and partial pressures of water vapor in the fence, as well as for changes in the thermal power of the heating system of the building premises for two climatological design areas. The calculations were performed according to the methodology presented below using a specially developed computer program.

**Keywords:** buildings, enclosing structures, thermal insulation, thermal engineering calculation, heat transfer resistance, temperature field, water vapor diffusion, dew point, heating system, thermal power

нии современных зданий требуется исследование процессов теплопередачи и влажностного режима наружных ограждающих конструкций, которые выполняются из сборных облегченных многослойных элементов, включающих эффективную тепловую изоляцию. С переходом к новому виду высотной многоэтажной застрой-

ки создаются и совершенствуются сборные конструкции зданий, используются новые теплоизоляционные, облицовочные и конструкционные материалы с разнообразными физическими свойствами, что обеспечивает высокую надежность зданий и энергоэффективность систем отопления. Ограждающие конструкции зданий и других строительных сооружений подвержены наиболее сложным физическим воздействиям. Процессы тепло- и массообмена в помещениях зданий и ограждающих конструкциях связаны с действием изменяющихся наружных климатических условий, а также с работой систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Поэтому ясное представление о процессах, происходящих в ограждениях при теплопередаче, и умение пользоваться соответствующими расчетами дают возможность проектировщику обеспечить требуемые тепло-технические качества наружных ограждающих конструкций. Аналогичные задачи возникают при разработке ограждающих конструкций энергетического оборудования объектов тепловой и атомной энергетики.

**Методика проведения исследований.** На первом этапе исследования формируются теплозащитные свойства наружных ограждений (стен, перекрытий, покрытий) путем выполнения следующих расчетов [1–3].

1. Определяют требуемое сопротивление теплопередаче  $R_0^{тр}$ , м<sup>2</sup>·К/Вт, наружного ограждения по формуле

$$R_0^{тр} = \frac{(t_{в} - t_{н})n}{\Delta t^H \alpha_{в}}, \quad (1)$$

где  $t_{в}$ ,  $t_{н}$  – расчетная температура внутреннего и наружного воздуха,  $t_{в}$  принимается по ГОСТ 30494,  $t_{н}$  – по СНиП 23-01-99\*;  $n$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения поверхности ограждения по отношению к наружному воздуху;  $\Delta t^H$  – нормативный температурный перепад между температурой внутреннего воздуха и внутренней поверхностью ограждения;  $\alpha_{в}$  – коэффициент теплоотдачи от воздуха помещения к поверхности ограждения, Вт/(м<sup>2</sup>·К), [2–5].

2. Рассчитывают градусо-сутки отопительного периода (ГСОП):

$$\text{ГСОП} = (t_{в} - t_{он})Z_{он}, \quad (2)$$

где  $t_{он}$ ,  $Z_{он}$  – средняя температура наружного воздуха в отопительный период, °С, и продолжительность отопительного периода, сут/год.

3. По ГСОП определяют минимальное приведенное сопротивление теплопередаче  $R_0^{эн}$ ,

м<sup>2</sup>·К/Вт, ограждающих конструкций здания, исходя из условий энергосбережения (СНиП 23-02–2003), [1, 2].

4. Производят сравнение сопротивлений теплопередаче  $R_0^{тр}$  и  $R_0^{эн}$ . Большее значение сопротивления теплопередаче (обозначим его через  $R_0$ ) принимают для выполнения последующих расчетов. При этом согласно п. 5.13 СНиП 23-02–2003 при выборе уровня теплозащиты здания предлагается величину приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций принимать не ниже значений  $R_0^{мин} = R_0^{эн} \times 0,63$  для стен жилых и общественных зданий.

5. Рассчитывают толщину  $\delta_{из}$ , м, теплоизоляционного слоя:

$$\delta_{из} = \lambda_{из} \left( \frac{R_0}{r} - \frac{1}{\alpha_{в}} - \sum_{i=1}^k R_i - \frac{1}{\alpha_{н}} \right), \quad (3)$$

где  $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя Вт/м<sup>2</sup>·К;  $R_0 = R_0^{эн}$ , если  $R_0^{эн} \geq R_0^{тр}$ , в противном случае  $R_0 = R_0^{тр}$ ;  $r$  – коэффициент теплотехнической однородности ограждения;  $\sum_{i=1}^k R_i = \sum_{i=1}^k \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  – сумма сопротивлений теплопроводности конструктивных слоев ограждения, м<sup>2</sup>·К/Вт;  $\delta_i$ ,  $\lambda_i$  – толщина, м, и коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),  $i$ -го конструктивного слоя;  $i = 1, 2, \dots, k$ ;  $k$  – количество конструктивных слоев в ограждении;  $\alpha_{н}$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности ограждения, Вт/(м<sup>2</sup>·К), [2–5].

6. Округляют расчетное значение  $\delta_{из}$  в большую сторону, принимая фактическое значение толщины слоя изоляции  $\delta_{из}^ф$  кратной 0,05 м.

7. Определяют фактическое сопротивление теплопередаче  $R_0^ф$ , м<sup>2</sup>·К/Вт:

$$R_0^ф = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum_{i=1}^k R_i + \frac{\delta_{из}^ф}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_{н}}. \quad (4)$$

8. Рассчитывают температурные поля в различных элементах наружного ограждения [1, 4, 5]. Одномерное стационарное температурное поле глади наружного ограждения определяют, используя зависимость

$$\tau_x = t_{в} - \frac{R_{в-x}}{R_0^ф} (t_{в} - t_{н})n, \quad (5)$$

где  $\tau_x$  – температура в произвольном сечении  $x$  ограждения, °С;  $R_{в-x}$  – сопротивление теплопередаче от воздуха помещения до рассматриваемого сечения  $x$ .

Температура внутренней поверхности наружного ограждения должна быть выше точ-

ки росы  $t_p$ , °С, в противном случае необходимо предусмотреть специальные мероприятия, предупреждающие конденсацию водяного пара на внутренней поверхности ограждения.

Приближенное значение  $t_p$ , °С, можно рассчитать по формуле

$$t_p = 20,1 - (5,75 - 0,00206 \cdot p_b)^2, \quad (6)$$

где  $p_b$  – парциальное давление водяного пара в воздухе помещения, Па.

9. Производят подбор заполнений световых проемов по СНиП II-3-79\*. Требуемое сопротивление теплопередаче окна  $R_{o,ок}^{тп}$  из условий энергосбережения определяют по табл. 16\*(К). Затем принимают конструкцию остекления по приложению 6\*(К) (справочное) с заданным для него приведенным сопротивлением теплопередаче  $R_{o,ок}^{тп}$ . При этом должно соблюдаться условие  $R_{o,ок}^{тп} \geq R_{o,ок}^{тп}$ .

На *втором этапе* исследования выполняют анализ влажностного режима ограждения. Расчеты проводят исходя из стационарного состояния с учетом только диффузии водяного пара через ограждение. При этом значения  $t_b$  и  $\varphi_b$  принимают те же, что и для расчетов конденсации на внутренней поверхности ограждения, а  $t_n$  – равной средней температуре наиболее холодного месяца  $t_{х.м.}$ .

Парциальное давление водяного пара  $p_x$ , Па, в расчетном сечении  $x$  ограждения рассчитывается по формуле [1, 2]:

$$p_x = p_b - \frac{(p_b - p_n)}{R_{п.о}} R_{п.в-x}, \quad (7)$$

где  $p_b$ ,  $p_n$  – парциальные давления водяного пара во внутреннем и наружном воздухе, Па, ( $p_b = P_b \varphi_b / 100$  и  $p_n = P_n \varphi_n / 100$ );  $P_b$ ,  $P_n$  – парциальные давления водяного пара во внутреннем и наружном воздухе при полном насыщении, Па;  $R_{п.в-x}$  – сопротивление паропроницанию от воздуха помещения до сечения  $x$ ;  $R_{п.о}$  – полное сопротивление паропроницанию ограждения,  $m^2 \cdot ч \cdot Па / мг$ .  $P_b$  определяют по  $t_b$ , а  $P_n$  – по  $t_n = t_{х.м.}$

Полное сопротивление паропроницанию  $R_{п.о}$ , Па, рассчитывается по формуле

$$R_{п.о} = R_{п.в} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\mu_i} + R_{п.н}, \quad (8)$$

где  $R_{п.в}$  и  $R_{п.н}$  – сопротивления паропроницанию на внутренней и наружной поверхности ограждения ( $R_{п.в} = 0,027$ ,  $R_{п.н} = 0,013 m^2 \cdot ч \cdot Па / мг$ );  $\delta_i$  и  $\mu_i$  – толщина, м, и коэффициент паропроницаемости,  $мг / (м \cdot ч \cdot Па)$ ,  $i$ -го слоя ограждения.

По известному температурному полю в сечениях ограждения по [1, 2] определяют парциальное давление  $P$  водяного пара при полном насыщении для характерных сечений ограждения и строят графики изменения действительного парциального давления водяного пара  $p = f_1(x)$  и парциального давления водяного пара при полном насыщении  $P = f_2(x)$  в сечении ограждения.

На *третьем этапе* исследования определяется тепловая мощность системы отопления здания и производится расчет поверхностей нагрева отопительных приборов. Методики расчетов тепловой мощности системы отопления и теплотехнического расчета отопительных приборов приведены в [6–8] и СНиП 41-01-2003.

**Результаты исследований.** Результаты численных расчетов температурных полей в наружных ограждениях для различных граничных условий при  $\lambda_{из} = 0,05$  Вт/(м·К) представлены в табл. 1–8, а парциальных давлений – в табл. 9, 10. На рис. 1 приведены графики изменения температуры в многослойных ограждениях при расположении тепловой изоляции с наружной стороны ограждения (рис. 1, а), с внутренней стороны ограждения (рис. 1, б) и при отсутствии тепловой изоляции в ограждении (рис. 1, в). На рис. 2 представлены графики распределения температур и парциальных давлений водяного пара в ограждении при расположении тепловой изоляции снаружи ограждения (рис. 2, а) и с его внутренней стороны (рис. 2, б). Расчеты выполнялись по программе для ЭВМ [9].

#### Обсуждение полученных результатов.

1. Анализ результатов расчетов показывает, что при расположении тепловой изоляции снаружи ограждения отапливаемого здания происходит равномерное понижение температуры от внутренней поверхности к наружной. Например, для г. Казани (см. табл. 1) при  $t_n = t_{н5} = -32$  °С,  $t_b = 20$  °С и  $\delta_3 = \delta_{из} = 0,15$  м имеем:  $t_1 = \tau_b = 18,36$ ;  $t_2 = 17,99$ ;  $t_3 = 11,87$ ;  $t_4 = -31,32$ ;  $t_5 = \tau_n = -31,38$  °С. При этом конструктивный слой ограждения  $\delta_2 = 0,37$  м (второй слой по направлению теплового потока  $q$ , см. рис 1, а) имеет положительную температуру при всех расчетных температурах наружного воздуха от 0 до -32 °С, что обеспечивает его высокую надежность. Резкое падение температуры происходит в теплоизоляционном слое от 11,87 до -31,32 °С.

При расположении тепловой изоляции с внутренней стороны в конструктивном слое ограждения в зимний период температура становится отрицательной (см. табл. 2, рис 1, б), что приводит к снижению его теплотехнических и механических свойств.

При снижении толщины слоя тепловой изоляции до 0,1 м характер изменения темпе-

Таблица 1. Результаты расчета температур в четырехслойном наружном ограждении при различных температурах наружного воздуха  $t_{н}$ .  
Климатологический район г. Казань ( $t_{н5} = -32$  °С).  $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = 0,37$  м;  $\delta_3 = \delta_{из} = 0,15/0,1$  м;  $\delta_4 = 0,0035$  м;  $t_b = 20$  °С. Тепловая изоляция расположена снаружи ограждения

$t_{н'}$ °С	$t_1 = \tau_{в'}$ °С	$t_{2'}$ °С	$t_{3'}$ °С	$t_{4'}$ °С	$t_5 = \tau_{н'}$ °С
0,0	19,36/19,12	19,23/18,93	16,87/15,68	0,26/0,36	0,24/0,33
-10	19,05/18,68	18,84/18,40	15,31/13,51	-9,61/-9,46	-9,64/-9,50
-20	18,73/18,24	18,45/17,86	13,74/11,35	-19,48/-19,28	-19,52/-19,33
-32	18,36/17,71	17,99/17,22	11,87/8,75	-31,32/-31,06	-31,38/-31,13

Таблица 2. Результаты расчета температур в четырехслойном наружном ограждении при различных температурах наружного воздуха  $t_{н}$ .  
Климатологический район г. Казань ( $t_{н5} = -32$  °С).  $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,15/0,1$  м;  $\delta_3 = 0,37$  м;  $\delta_4 = 0,02$  м;  $t_b = 20$  °С. Тепловая изоляция расположена с внутренней стороны ограждения

$t_{н'}$ °С	$t_1 = \tau_{в'}$ °С	$t_{2'}$ °С	$t_{3'}$ °С	$t_{4'}$ °С	$t_5 = \tau_{н'}$ °С
0,0	19,37/19,13	19,23/18,94	2,72/3,75	0,38/0,52	0,24/0,33
-10	19,05/18,69	18,85/18,41	-5,93/-4,38	-9,44/-9,22	-9,64/-9,51
-20	18,73/18,25	18,46/17,88	-14,57/-12,50	-19,25/-18,96	-19,52/-19,34
-32	18,36/17,73	18,00/17,24	-24,94/-22,26	-31,02/-30,65	-31,38/-31,14

Таблица 3. Результаты расчета температур в трехслойном наружном ограждении при различных температурах наружного воздуха  $t_{н}$ .  
Климатологический район г. Казань ( $t_{н5} = -32$  °С).  $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = 0,62$  м;  $\delta_3 = 0,02$  м;  $t_b = 20$  °С. Тепловая изоляция отсутствует (трехслойное ограждение)

$t_{н'}$ °С	$t_1 = \tau_{в'}$ °С	$t_{2'}$ °С	$t_{3'}$ °С	$t_4 = \tau_{н'}$ °С
0,0	17,50	16,97	1,48	0,95
-10	16,25	15,45	-7,78	-8,58
-20	15,01	13,93	-17,04	-18,11
-32	13,51	12,11	-28,15	-29,54

Таблица 4. Результаты расчета температур в четырехслойном наружном ограждении при различных температурах наружного воздуха  $t_{н}$ .  
Климатологический район г. Москва ( $t_{н5} = -26$  °С).  $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = 0,37$  м;  $\delta_3 = \delta_{из} = 0,1/0,05$  м;  $\delta_4 = 0,0035$  м;  $t_b = 18$  °С. Тепловая изоляция расположена снаружи ограждения

$t_{н'}$ °С	$t_1 = \tau_{в'}$ °С	$t_{2'}$ °С	$t_{3'}$ °С	$t_{4'}$ °С	$t_5 = \tau_{н'}$ °С
0,0	17,21/16,72	17,04/16,44	14,11/11,69	0,33/0,53	0,30/0,49
-10	16,77/16,00	16,50/15,58	11,95/8,19	-9,49/-9,18	-9,53/-9,26
-20	16,33/15,29	15,97/14,71	9,78/4,68	-19,31/-18,89	-19,37/-18,98
-26	16,06/14,86	15,65/14,19	8,48/2,56	-25,20/-24,71	-25,27/-24,81

Таблица 5. Результаты расчета температур в четырехслойном наружном ограждении при различных температурах наружного воздуха  $t_{н}$ .  
Климатологический район г. Москва ( $t_{н5} = -26$  °С).  $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,1/0,05$  м;  $\delta_3 = 0,37$  м;  $\delta_4 = 0,02$  м;  $t_b = 18$  °С. Тепловая изоляция расположена с внутренней стороны ограждения

$t_{н'}$ °С	$t_1 = \tau_{в'}$ °С	$t_{2'}$ °С	$t_{3'}$ °С	$t_{4'}$ °С	$t_5 = \tau_{н'}$ °С
0,0	17,21/16,73	17,06/16,46	3,73/5,44	0,47/0,75	0,30/0,48
-10	16,78/16,03	16,52/15,61	-4,75/-1,54	-9,28/-8,83	-9,54/-9,26
-20	16,34/15,36	15,99/14,75	-12,88/-8,52	-19,02/-18,41	-19,37/-19,99
-26	16,08/14,9	15,67/14,24	-17,75/-12,71	-24,86/-24,16	-25,27/-24,83

Таблица 6. Результаты расчета температур в трехслойном наружном ограждении при различных температурах наружного воздуха  $t_{н.}$ . Климатологический район г. Москва ( $t_{н5} = -26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,62\text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,02\text{ м}$ ;  $t_{в} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тепловая изоляция отсутствует (трехслойное ограждение)

$t_{н'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_1 = \tau_{в'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{2'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{3'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_4 = \tau_{н'}$ , $^{\circ}\text{C}$
0,0	15,75	15,27	1,33	0,85
-10	14,50	13,75	-7,93	-8,68
-20	13,26	12,24	-17,19	-18,21
-26	12,51	11,33	-22,74	-23,92

Таблица 7. Результаты расчета температур в четырехслойном наружном ограждении при  $t_{н} = t_{х.м}$  при различных расположениях тепловой изоляции (ТИ) ( $\lambda_{из} = 0,05\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ). Казань ( $t_{х.м} = -13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{в} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ );  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,37\text{ м}$ ;  $\delta_3 = \delta_{из} = 0,1/0,05\text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,0035\text{ м}$ ;  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,1/0,05\text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,37\text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,62\text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,02\text{ м}$

Расположение ТИ в ограждении	$t_1 = \tau_{в'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{2'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{3'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{4'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_5 = \tau_{н'}$ , $^{\circ}\text{C}$
1. С наружной стороны $\delta_{из} = 0,15/0,1\text{ м}$	18,93/18,53	18,71/18,21	14,76/12,76	-13,06/-12,89	-13,10/-12,94
2. С внутренней стороны $\delta_{из} = 0,15/0,1\text{ м}$	18,94/18,54	18,71/18,22	-8,95/-7,22	-12,87/-12,63	-13,10/-12,95
3. ТИ отсутствует (трехслойное ограждение)	15,82	14,92	-11,02	-11,92	

Таблица 8. Результаты расчета температур в четырехслойном наружном ограждении при  $t_{н} = t_{х.м}$  при различных расположениях тепловой изоляции (ТИ). Москва ( $t_{х.м} = -10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{в} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). 1.  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,37\text{ м}$ ;  $\delta_3 = \delta_{из} = 0,1/0,05\text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,0035\text{ м}$ ; 2.  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,1/0,05\text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,37\text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,02\text{ м}$ ; 3.  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,62\text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,02\text{ м}$

Расположение ТИ в ограждении	$t_1 = \tau_{в'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{2'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{3'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{4'}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_5 = \tau_{н'}$ , $^{\circ}\text{C}$
1. С наружной стороны $\delta_{из} = 0,1\text{ м}$	16,76/15,99	16,49/15,56	11,90/8,12	-9,69/-9,37	-9,73/-9,44
2. С внутренней стороны $\delta_{из} = 0,1\text{ м}$	16,77/16,02	16,50/15,59	-4,92/-1,68	-9,47/-9,02	-9,73/-9,45
3. ТИ отсутствует (трехслойное ограждение)	14,48	13,72	-8,11	-8,87	

Таблица 9. Результаты расчета парциальных давлений водяного пара в четырехслойном ограждении при различных расположениях тепловой изоляции (ТИ). ( $\lambda_{из} = 0,05\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ). Казань ( $t_{х.м} = -13,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{в} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). 1.  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,37\text{ м}$ ;  $\delta_3 = \delta_{из} = 0,1/0,05\text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,0035\text{ м}$ ; 2.  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,1/0,05\text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,37\text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,02\text{ м}$ ; 3.  $\delta_1 = 0,02\text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,62\text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,02\text{ м}$

Расположение ТИ в ограждении	$p_1$ , Па	$p_2$ , Па	$p_3$ , Па	$p_4$ , Па	$p_5$ , Па
Парциальное давление при полном насыщении водяного пара в воздухе					
1. С наружной стороны	2187,3/2132,8	2156,2/2090,3	1678,7/1473,6	197,5/201,0	197,0/189,5
2. С внутренней стороны	2188,1/2133,8	2157,2/2092,2	287,0/332,0	203,0/207,0	197,0/204,0
3. ТИ отсутствует (трехслойное ограждение)	1796,5	1695,8	236,0	219	
Фактическое парциальное давление водяного пара					
1. С наружной стороны	1280,7/1279,9	1252,4/1248,6	681,3/573,54	171,9/173,4	143,6/140,0
2. С внутренней стороны	1280,8/1280,1	1253,1/1247,5	753,4/856,5	193,7/198,9	165,9/166,3
3. ТИ отсутствует (трехслойное ограждение)	1280,3	1249,2	197,3	166,2	

Таблица 10. Результаты расчета парциальных давлений водяного пара в четырехслойном ограждении при различных расположениях тепловой изоляции (ТИ) ( $\lambda_{из} = 0,05 \text{ Вт/(м·К)}$ ).  
 Москва ( $t_{x,м} = -10,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{в} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ). 1.  $\delta_1 = 0,02 \text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,37 \text{ м}$ ;  $\delta_3 = \delta_{из} = 0,1/0,05 \text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,0035 \text{ м}$ ;  
 2.  $\delta_1 = 0,02 \text{ м}$ ;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,1/0,05 \text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,37 \text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,02 \text{ м}$ ; 3.  $\delta_1 = 0,02 \text{ м}$ ;  $\delta_2 = 0,62 \text{ м}$ ;  $\delta_3 = 0,02 \text{ м}$

Расположение ТИ в ограждении	$p_{1'}$ Па	$p_{2'}$ Па	$p_{3'}$ Па	$p_{4'}$ Па	$p_{5'}$ Па
Парциальное давление при полном насыщении водяного пара в воздухе					
1. ТИ с наружной стороны	1970,6/1816,4	1875,6/1766,9	1393,2/1081,4	266/275,0	265,5/273,0
2. ТИ с внутренней стороны	1908,8/1819,4	1877,0/1770,5	405/531,0	270,5/284,0	266/270,0
3. ТИ отсутствует (трехслойное ограждение)	1658,4	1569,6	307	286,5	
Фактическое парциальное давление водяного пара					
1. ТИ с наружной стороны	1130,2/1129,3	1102,9/1095,9	550,2/423,5	221,6/223,3	194,2/190,0
2. ТИ с внутренней стороны	1130,3/1129,4	1103,6/1097,0	782,51/902,6	242,5/248,6	215,8/216,2
3. ТИ отсутствует (трехслойное ограждение)	1130,5	1105,0	241,2	215,7	

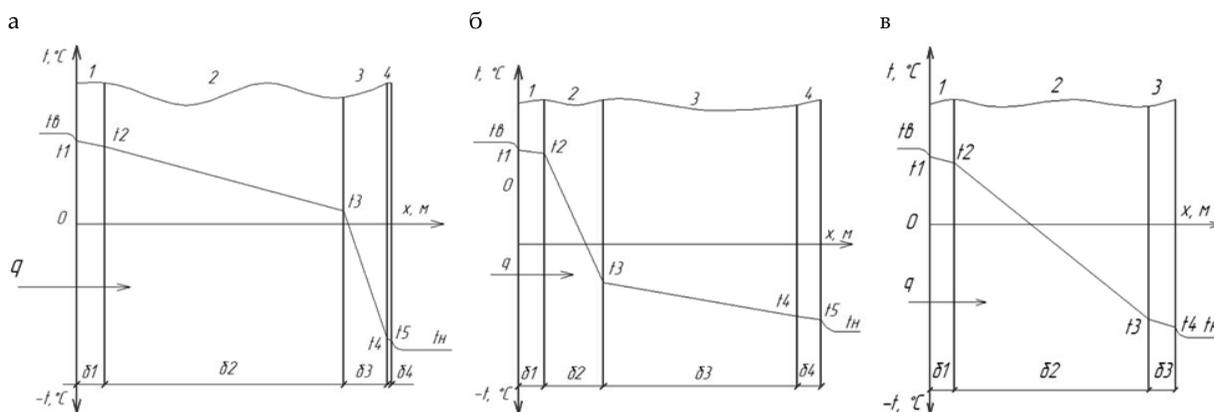


Рис. 1. Схемы наружных ограждающих конструкций зданий при расположении тепловой изоляции снаружи ограждения (а), с внутренней стороны ограждения (б), при отсутствии тепловой изоляции в ограждении (в):  
 1, 2, 3, 4 – номера слоев ограждения;  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$  – температуры на границах слоев ограждения;  
 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$  – толщины слоев ограждения;  $t_{в}, t_{н}$  – температура внутреннего и наружного воздуха

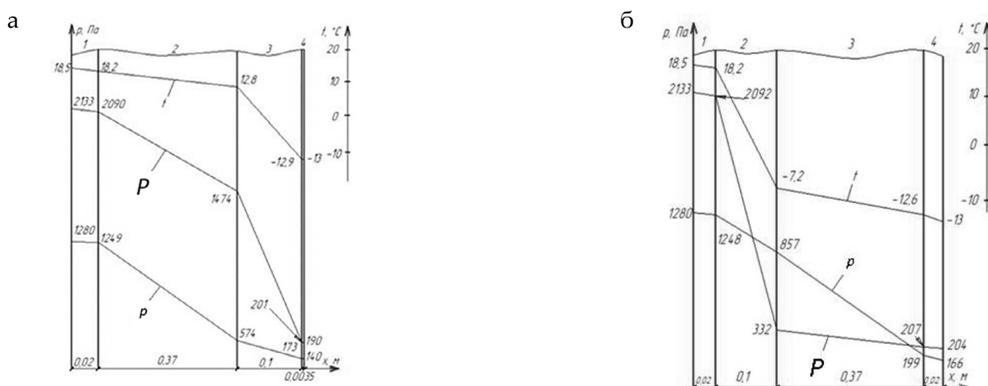


Рис. 2. Графики распределения температур и парциальных давлений водяного пара в ограждении при расположении тепловой изоляции снаружи ограждения (а), с внутренней стороны ограждения (б):  
 1, 2, 3, 4 – номера слоев ограждения;  $t$  – график изменения температуры;  
 P – график изменения парциального давления водяного пара при полном насыщении;  
 p – график изменения действительного парциального давления водяного пара

ратуры в ограждении остается таким же, как и при  $\delta_{из} = 0,15$  м. При этом числовые значения температур на границах слоев ограждения незначительно снижаются (см. значения температур в знаменателях дробей табл. 1, 2).

При отсутствии в наружном ограждении тепловой изоляции (ограждение состоит из трех слоев: 1-й внутренний и 3-й наружный слои – известково-песчаная штукатурка,  $\delta_1 = \delta_3 = 0,02$  м; 2-й конструктивный слой – кирпич силикатный,  $\delta_2 = 0,62$  м) происходит резкое изменение температуры в конструктивном слое (см. рис. 1, в, табл. 3): при  $t_n = t_{ис} = -32$  °С  $t_b = 20$  °С имеем:  $t_1 = \tau_b = 13,51$ ;  $t_2 = 12,11$ ;  $t_3 = -28,15$ ;  $t_4 = \tau_n = -29,54$  °С. В конструктивном слое в зимний расчетный период ( $t_n = -32$  °С) температура изменяется от +12,11 до -28,15 °С, что снижает теплотехнические и механические свойства этого слоя ограждения вследствие замерзания влаги в нем.

Аналогичный характер изменения температуры в наружном ограждении отапливаемого здания наблюдается для климатологического района г. Москвы. Исследования выполнены при  $t_b = 18$  °С,  $t_{ис} = -26$  °С для четырехслойных ограждений при расположении тепловой изоляции с наружной стороны ( $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,1/0,05$  м;  $\delta_3 = 0,37$  м;  $\delta_4 = 0,0035$  м) и с внутренней стороны ограждения после слоя штукатурки по направлению теплового потока  $q$  ( $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = \delta_{из} = 0,1/0,05$  м;  $\delta_3 = 0,37$  м;  $\delta_4 = 0,02$  м) (см. табл. 4, 5). При этом рассмотрены случаи, когда  $\delta_{из} = 0,1$  м и  $\delta_{из} = 0,05$  м. Результаты исследований для ограждения при отсутствии тепловой изоляции ( $\delta_1 = 0,02$  м;  $\delta_2 = 0,62$  м;  $\delta_3 = 0,02$  м) приведены в табл. 6. При расположении тепловой изоляции с внутренней стороны, а также при отсутствии тепловой изоляции в конструктивном слое ограждения в зимний период температура становится отрицательной (см. табл. 5, 6), что приводит к снижению его теплотехнических и механических свойств.

2. Анализ влажностного режима наружного ограждения проведен для стационарного состояния и с учетом только диффузии водяного пара через ограждение при значениях  $t_n = t_{х.м.}$ . Вначале выполнен расчет температурных полей в ограждениях (см. табл. 7, 8, рис. 2), а затем по известным значениям температур рассчитывались парциальные давления водяного пара при полном насыщении и фактические значения парциальных давлений водяного пара, движущегося внутри ограждения (см. табл. 9, 10, рис. 2). Рассмотрены четырехслойные конструкции при расположении тепловой изоляции с наружной и с внутренней стороны ограждения и трехслойная конструкция при отсутствии тепловой изоляции. Исследования проведены для двух

климатологических районов Российской Федерации – г. Казани и г. Москвы.

Анализ результатов исследований влажностных режимов ограждений показывает, что при расположении тепловой изоляции с внутренней стороны в конструктивном слое ограждения в зимний период всегда происходит конденсация водяных паров (см. рис. 2, б), что приводит к его увлажнению и последующему разрушению. Расположение тепловой изоляции с внутренней стороны ограждения недопустимо. При отсутствии тепловой изоляции конденсация влаги в ограждении не наблюдается, однако в зимний период конструктивный слой ограждения работает при отрицательных температурах (см. табл. 3, 6–8).

3. Выполнена оценка влияния толщины тепловой изоляции на изменение тепловой мощности системы отопления на примере девятиэтажного жилого дома для углового помещения, имеющего следующие размеры:  $A_c = 3,5$ ;  $A_z = 6$ ;  $h_{эт} = 2,8$ ,  $h_{ок} \times b_{ок} = 1,5 \times 1,5$  м. Тепловая мощность системы отопления помещений здания рассчитывалась по СНиП 41-01-2003 и [6–8]. Установлено, что при снижении толщины тепловой изоляции с 0,15 до 0,1 м ( $\lambda_{из} = 0,05$  Вт/(м·К)) расчетная тепловая мощность системы отопления помещения здания повышается с 1136,52 до 1306,06 Вт (на 14,92 %) для климатологического района г. Казани. Для г. Москвы снижение толщины слоя с 0,1 до 0,05 м обуславливает повышение тепловой мощности на 28,84 % (с 1066,31 до 1373,83 Вт).

Дополнительно проведено исследование влияния числового значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного слоя  $\lambda_{из}$  на распределение температуры в многослойном ограждении и на величину тепловой мощности системы отопления помещений здания. При повышении  $\lambda_{из}$  в два раза с 0,05 до 0,1 Вт/(м·К) мощность системы отопления помещения здания возрастает на 27,07 % (с 1306,06 до 1659,63 Вт). При этом температура на внутренней поверхности ограждения понижается на 1,42 °С (с 17,71 до 16,29 °С). Расчеты выполнены для климатологического района г. Казани при условиях, что тепловая изоляция расположена снаружи ограждения,  $\delta_{из} = 0,1$  м,  $t_n = -32$  °С,  $t_b = 20$  °С. Аналогичные результаты получаются для климатологического района г. Москвы. Мощность системы отопления помещения здания возрастает на 28,25 % (с 1066,31 до 1367,5 Вт), температура на внутренней поверхности ограждения понижается на 1,2 °С (с 16,06 до 14,86 °С).

**Выводы.** 1. Разработаны методика и программа для ЭВМ теплотехнических расчетов наружных многослойных ограждений и тепловой мощности системы отопления зда-

ния. Выполнены теплотехнические расчеты четырехслойных и трехслойных ограждений для двух климатологических районов Российской Федерации – г. Казани и г. Москвы. Рассмотрены варианты расположения тепловой изоляции с наружной и внутренней стороны ограждения и трехслойная конструкция при отсутствии тепловой изоляции. Установлено, что при расположении тепловой изоляции с внутренней стороны в конструктивном слое ограждения в зимний период всегда происходит конденсация водяных паров, что приводит к увлажнению и последующему разрушению конструктивного слоя.

2. Произведена оценка влияния параметров тепловой изоляции на изменение температурного поля в ограждении и тепловой мощности системы отопления на примере девятиэтажного жилого дома. Показано, что при снижении  $\delta_{из}$  с 0,15 до 0,1 м расчетная тепловая мощность системы отопления помещения здания повышается на 14,92 % для климатологического района г. Казани и на 28,84 % для г. Москвы при снижении  $\delta_{из}$  с 0,1 до 0,05 м. При повышении  $\lambda_{из}$  в два раза с 0,05 до 0,1 Вт/(м·К) мощность системы отопления помещения здания, расположенного в г. Казани, возрастает на 27,07 %, а для г. Москвы – на 28,25 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудинов А.А. Строительная теплофизика. М.: ИНФРА-М, 2012. 262 с.
2. Справочник проектировщика: внутренние санитарно-технические устройства. Ч.1. Отопление / под. ред. И.Г. Старовойтова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1990. 344 с.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1973. 287 с.
4. Кудинов А.А. Тепломассообмен. М.: ИНФРА-М, 2012. 375 с.
5. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 562 с.
6. Сканава А.Н., Махов Л.М. Отопление. М.: АСВ, 2002. 576 с.
7. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Отопление гражданского здания. Самара : СамГТУ, 2020. 83 с.
8. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: монография. М.: Машиностроение, 2011. 374 с.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617810 Российская Федерация. Расчет ограждающих конструкций и системы отопления здания / А.А. Кудинов, С. К. Зиганшина; заявл. 28.03.2024; опубл. 05.04.2024.

## REFERENCES

1. Kudinov A.A. *Stroitel'naja teplofizika* [Construction Thermal Physics]. Moscow, INFRA, 2012. 262 p.
2. Staroverova I.G. *Spravochnik proektirovshhika: vnutrennie sanitarno-tehnicheskie ustrojstva. Ch.1. Otoplenie* [Designer's Handbook: internal sanitary facilities. Ch.1. Heating]. Moscow, Stroyizdat, 1990. 344 p.
3. Fokin K.F. *Stroitel'naja teplotehnika ograzhdajushhij chastej zdaniy. Izd. 4-e, pererab. i dop.* [Construction heat engineering of enclosing parts of buildings. Ed. 4th, revised. and add.]. Moscow, INFRA-M, 1973. 287 p.
4. Kudinov A.A. *Teplomassoobmen* [Heat-and-mass transfer]. Moscow, INFRA-M, 2012. 375 p.
5. Tsvetkov F.F., Grigoriev B.A. *Teplomassoobmen* [Heat-and-mass transfer]. Moscow, MPEI Publishing House, 2011. 562 p.
6. Scanavi A.N., Makhov L.M. *Otoplenie* [Heating]. Moscow, ACV, 2002. 576 p.
7. Kudinov A.A., Ziganshina S.K. *Otoplenie grazhdanskogo zdaniya* [Heating of civil building]. Samara, SamSTU, 2020. 83 p.
8. Kudinov A.A., Ziganshina S.K. *Jenergoberezenie v teplojenergetike i teplotehnologijah: monografija* [Energy saving in heat power engineering and heat technologies: monograph]. Moscow, Mechanical Engineering, 2011. 374 p.
9. Kudinov A.A., Ziganshina S.K. *Raschet ograzhdajushhij konstrukcij i sistemy otoplenija zdaniya* [Calculation of enclosing structures and building heating system]. Patent RF, no. 2024617810, 2024.

Об авторах:

**КУДИНОВ Анатолий Александрович**

доктор технических наук, профессор, профессор  
кафедры тепловых электрических станций  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: a.a.kudinov@yandex.ru

**KUDINOV Anatolii A.I.**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Professor of the Thermal Power Plants Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244  
E-mail: a.a.kudinov@yandex.ru

**ЗИГАНШИНА Светлана Камилловна**

доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры тепловых электрических станций  
Самарский государственный технический университет  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: svet.zig@yandex.ru

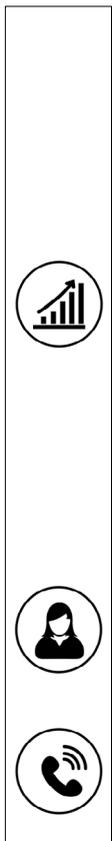
**ZIGANSHINA Svetlana K.**

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,  
Professor of the Thermal Power Plants Chair  
Samara State Technical University  
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 244  
E-mail: svet.zig@yandex.ru

Для цитирования: Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Анализ влияния параметров тепловой изоляции на эффективность ограждающих конструкций и системы отопления здания // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 3. С. 60–68. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.07.

For citation: Kudinov A.A., Ziganshina S.K. Analysis of the influence of thermal insulation parameters on the effectiveness of enclosing structures and building heating systems. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 3, pp. 60–68. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.03.07.

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
АРХИТЕКТУРНЫЙ ЖУРНАЛ  
INNOVATIVE PROJECT**



Основан в 2016 году. Учредителем журнала является Самарский государственный технический университет

Журналу присвоен международный номер периодических изданий ISSN 2500-3437

Статьи, представленные для публикации в журнале, проходят обязательное независимое рецензирование, рецензентами выступают члены редакционной коллегии и ведущие российские ученые, работающие в сфере научной тематики журнала

Журнал выходит по следующим тематическим специальностям:

- Архитектура и градостроительство:
  - 2.1.11. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия
  - 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности
  - 2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов
- Прикладное искусство и дизайн:
  - 5.10.1. Теория и история искусства

Журнал индексируется: РИНЦ, Crossref.

Каждой статье присваивается идентификатор цифрового объекта DOI

**ПУБЛИКАЦИЯ В ЖУРНАЛЕ БЕСПЛАТНАЯ**

**ТЕРЯГОВА Александра Николаевна**

кандидат архитектуры, главный редактор

443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 194, АСА СамГТУ

Техническая поддержка:

Филиппов Василий Дмитриевич

Телефон: +7 (846) 339-14-59

E-mail: filippov.vd@samgtu.ru