

Метод расчета дополнительного внутреннего утепления строительных конструкций

Ю. В. Иванова, С. Ю. Кадокова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Требования по увеличению сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий и сооружений непрерывно возрастают. В то же время ряд строений невозможно утеплить снаружи из-за их охранного архитектурного статуса. Владельцы жилья тоже не могут вносить изменения в конструкцию фасада в объеме своей квартиры. Предложена конструкция теплоизолирующей панели для монтажа на внутренней поверхности квартирной стены. Приведен метод расчета сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, утепленной таким образом.

Ключевые слова: энергосбережение, утепление стен, внутренние теплоизолирующие панели, метод расчета теплофизических показателей.

Сокращение тепловых нагрузок на строящиеся, реконструируемые жилые и общественные здания является актуальной общегосударственной задачей. Она начала решаться законодательным образом, путем введения в нормативный документ СНиП-II-3-79* «Строительная теплотехника» изменения №3, которое предписывало повышение теплозащитных свойств стен, покрытий, светопрозрачных конструкций по сравнению с санитарными требованиями по минимальной температуре внутренних поверхностей в 1,8 раза (с 1996 г.) и более чем в 3 раза с 2000 г.

Выход в свет СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» закрепил базовый уровень энергетической эффективности зданий и сооружений, на который и ориентируются все последующие правовые документы, посвященные этой тематике.

Федеральный закон РФ от 23.11.2009 г. № 261 ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и Постановление Правительства РФ от 25.01.2011 г. «Об утверждении Правил установления требований энергетической

эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам эффективности многоквартирных домов» предполагали повышение базового показателя (по сравнению с 2003 г.) к 2011 г. – на 15%; к 2016 г. – на 30%; к 2020 г. – на 40%.

Постановление № 603 от 20.05.2017 г. передвинуло цели 2020 г. на более поздний период, 2028 г.

Региональные власти также имеют право устанавливать свои требования к проектно-строительной документации в части энергоэффективности зданий. Так, Правительство г. Москвы, своим Постановлением № 460 от 03.10.2011 г. определило удельный расход тепловой энергии системой отопления здания (10 этажей и выше) в 71 квт.ч/м². (МГСН 2.01.-99 «Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлектроснабжению»).

В то же время СП 50.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 23-02-2003) принимает удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, отнесенную к отапливаемому объему зданий. Такую нестыковку размерностей отмечают многие инженеры-эксперты, например, в [1].

Тем не менее все специалисты сходятся в одном мнении – наиболее приемлемым решением для сохранения топливных ресурсов страны будет дополнительная тепловая изоляция стен и покрытий для существующих зданий массовых серий, несущая способность и пожаробезопасность которых на сегодняшний день и на срок не менее 10 лет, отвечают современным требованиям.

Ряд авторов призывает увеличивать приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций жилых зданий до значений принятых в ряде Европейских стран и в Республике Беларусь [2].

Вопросам технологического и экономического процесса усиления наружной теплоизоляции зданий посвящены как фундаментальные издания [3-4-5], так и научные исследования. Так, в диссертационной работе [6] Горшкова А.С., автор показал, что значительные затраты тепловой энергии в промышленности относятся к обеспечению микроклимата производственных, административных и вспомогательных помещений, т.е. к их отоплению.

Горшков А.С. кроме специальных вопросов математического моделирования, разработал методы расчета потенциала энергосбережения, достигаемого в результате конструктивно-технических мероприятий, в частности, наружного утепления строительной оболочки зданий.

Оценке эффективности наружной стеновой теплоизоляции посвящены и журнальные публикации [7-8-9].

В то же время совсем не освещается вопрос о внутреннем расположении дополнительной тепловой изоляции, хотя актуальность этой проблемы определяется следующими соображениями. В первую очередь этот аспект касается тех зданий, в которых фасад охраняется, как архитектурный памятник. Во вторую очередь такая теплоизоляция применима для ремонта зон повышенной теплоотдачи, выявленных при тепловизионном обследовании (даже в относительно новых домах). В-третьих, внедрение индивидуального учета потребления тепловой энергии на нужды отопления подвигает жильцов к самостоятельной оптимизации своих платежей и исключению платежей за соседей, отключивших свои отопительные приборы и исключаящих перетоки теплоты между квартирами, о чем, в частности, говорится в [10].

Для решения технической задачи внутреннего утепления ограждающей конструкции была предложена конструкция утеплительной панели [11]. Основой такой панели является воздушная прослойка, толщиной не более

10 мм, между внутренней поверхностью стены и поверхностью, обращенной внутрь помещения, выполненной из тонкостенной гипсокартонной плиты. Для предотвращения возникновения конвективных потоков воздуха в образовавшейся щели, было предложено заполнить её фольгой, уложенной в виде гофр. Такое волнообразное размещение с просветом не более 5 мм осуществлялось на экспериментальном стенде не только параллельно потоку, но и со смещением на 45° , типа морских волн, накатывающихся на берег. Предполагалось, что такое расположение минимизирует конвективные потоки в прослойках. Имелось ввиду, что применение зеркальных поверхностей и сокращение геометрических размеров воздушных прослоек приведет к уменьшению теплового потока через панельное устройство.

В результате проведенных экспериментальных исследований получено среднее термическое сопротивление предлагаемой конструкции, величиной $R = 0,8 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$.

Так как целью исследования является разработка общих способов утепления стен зданий «изнутри», то задачей данной работы является верификация полученных экспериментальных данных путем теоретического расчета теплового потока через наружную стену, снабженную дополнительными конструкциями.

Методологической основой исследования являются основные положения теории лучисто-конвективного теплообмена, стационарной теплопередачи через ограждения. Предлагается следующий порядок расчета: определяются температуры поверхностей в конструкции «наружная стена-внутренний утеплитель»; рассчитывается лучистая составляющая теплового потока через конструкцию; оценивается конвективная составляющая данного теплового потока.

Для вычисления температуры внутренней поверхности ограждения применим известную формулу из [12]:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{в}} - (R_{\text{в}} + \sum_{\text{в}}^{n-1} R) \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0}, \quad (1)$$

где: $t_{\text{п}}$ – температура на поверхностях панелей, °С; $t_{\text{н}}$, $t_{\text{в}}$ – расчетные температуры наружного и внутреннего воздуха, °С; $R_{\text{в}}$ – термическое сопротивление внутренней поверхности панелей, м²°С/Вт; R_0 – общее сопротивление теплопередаче всей конструкции.

Для расчета лучистой теплоотдачи в прослойке из алюминиевой фольги предложены следующие расчетные схемы:

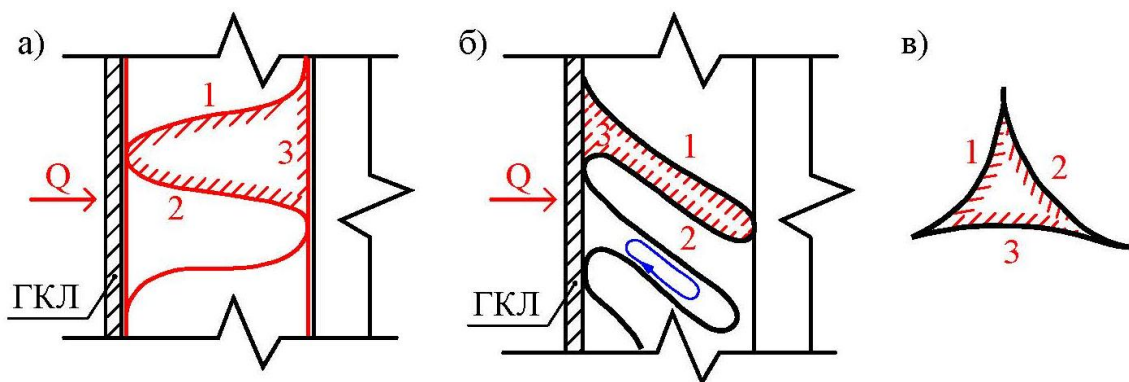


Рис.1. – Расчетные схемы теплообмена

а – панель с горизонтальным размещением «волн» алюминиевой фольги; б – панель с наклонным размещением «волн» алюминиевой фольги;

в – модельный расчетный аналог

Для определения количества теплоты, передаваемой в замкнутой системе, используем известную формулу [13]:

$$Q_{\text{л}} = 5,77 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot H, \text{ Вт} \quad (2)$$

где: T_1 , T_2 абсолютные температуры поверхностей тела 1 и тела 2;
 $H = \varphi_{12} \cdot F_1 = \varphi_{21} \cdot F_2$ – взаимная излучающая поверхность тела 1 и тела 2; F_1 , F_2 – поверхности тел 1 и 2; φ_{12} , φ_{21} – средние по поверхности угловые коэффициенты излучения тела 1 на тело 2 и тела 2 на тело 1; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \cdot \varphi_{12} + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \varphi_{21}}, \quad (3)$$

где: ε_1 и ε_2 – степень черноты тел 1 и 2 ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,055$ – для алюминиевой фольги).

Для трех поверхностей, образующих замкнутую систему:

$$\varphi_{12} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{F_2}{F_1} - \frac{F_3}{F_1} \right), \quad (4)$$

$$\varphi_{21} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{F_1}{F_2} - \frac{F_3}{F_2} \right), \quad (5)$$

$$H_{12} = \frac{1}{2} \cdot (F_1 + F_2 - F_3). \quad (6)$$

В результате расчета по формулам 3 – 6:

– для утеплительной панели №1:

$$F_1 = 0,0325 \text{ м}; F_2 = 0,0325 \text{ м}; F_3 = 0,03 \text{ м};$$

$$\varphi_{12} = 0,538; \varphi_{21} = 0,462; H_{12} = 0,048; \varepsilon_{\text{пр}} = 0,055.$$

– для утеплительной панели № 2:

$$F_1 = 0,041 \text{ м}; F_2 = 0,032 \text{ м}; F_3 = 0,02 \text{ м};$$

$$\varphi_{12} = 0,638; \varphi_{21} = 0,725; H_{12} = 0,046; \varepsilon_{\text{пр}} = 0,041.$$

Количество теплоты, передаваемой конвекцией от одной поверхности к другой определяется формулой, [14]:

$$Q_k = \alpha_k \cdot (t_1 - t_2), \quad (7)$$

где: α_k – коэффициент конвективного теплообмена, отнесенный к разности температур на поверхности прослойки, Δt , °С.

Значение коэффициента конвективного теплообмена определяется через критерий Нуссельта (Nu), Грасгофа (Gr), Прандтля (Pr), связанных критериальным уравнением, полученным в результате проведения экспериментов по определению коэффициента теплопроводности утеплительных панелей:

$$Nu = 0,116(CrPr)^{0,25}, \quad (8)$$

$$CrPr \approx 10^8 \cdot l^3 \cdot \Delta t, \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{возд}}}{l}. \quad (10)$$

Результаты расчетов по формулам (2) – (10) приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица №1

Результаты расчета теплового потока через наружную стену и
утеплительную панель типа 1

№	t_n	t_b	$t_{пан1}$	t_1	t_2	t_3	$Gr \cdot Pr$	Nu	α_k	$Q_{к1}$	$Q_{л1}$	$Q_{общ1}$	$Q_{экс1}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3	19,5	18,2	18,3	11,5	3,4	19809,55	1,38	1,10	7,41	0,10	7,5	8,7
2	-13	17	15,0	14,8	2,5	-12,3	41242,51	1,65	1,32	16,19	0,16	16,4	14,0
3	-7	18,6	16,8	16,7	6,2	-6,4	34330,69	1,58	1,26	13,20	0,15	13,3	12,5
4	-2	18,7	17,3	17,2	8,7	-1,5	26095,29	1,47	1,18	9,97	0,12	10,1	9,5
5	-6	18,6	16,8	16,8	6,7	-5,5	32475,17	1,56	1,25	12,51	0,14	12,6	12,5
6	4	19,6	18,3	18,4	12,1	4,3	18578,69	1,35	1,08	6,90	0,09	7,0	8,7
7	1	19,3	18,0	17,9	10,5	1,4	22335,51	1,42	1,13	8,47	0,11	8,6	8,7
8	0	19,3	17,8	17,9	10,0	0,4	23914,28	1,44	1,15	9,09	0,11	9,2	10,2
9	-3	18,8	17,2	17,2	8,3	-2,5	27886,45	1,50	1,20	10,67	0,13	10,8	10,9
10	-6	18,5	16,8	16,7	6,7	-5,5	32578,78	1,56	1,25	12,47	0,14	12,6	11,7
11	-12	17,2	15,1	15,0	3,1	-11,4	40071,24	1,64	1,31	15,65	0,16	15,8	14,8
12	2	19,1	17,9	17,8	10,8	2,4	20779,71	1,39	1,11	7,78	0,10	7,9	8,0
13	5	19,7	18,5	18,6	12,6	5,3	17433,95	1,33	1,07	6,40	0,09	6,5	8,0
14	1	19,4	17,9	18,0	10,5	1,4	22421,61	1,42	1,14	8,53	0,11	8,6	10,2
15	2	19,5	18,1	18,2	11,0	2,4	21178,33	1,40	1,12	8,00	0,10	8,1	9,5
16	-3	19	17,4	17,4	8,6	-2,5	27939,03	1,50	1,20	10,77	0,13	10,9	10,9
17	-6	18,8	17,0	16,9	6,8	-5,5	32278,80	1,55	1,24	12,59	0,14	12,7	12,5
18	-8	18,5	16,8	16,5	5,7	-7,4	35828,40	1,60	1,28	13,81	0,15	14,0	11,7

Таким образом, в результате проведенных расчетов видно, что теплообмен в прослойке происходит в основном за счет конвекции. Общий теплообмен в утеплительной панели типа 1 больше чем в утеплительной панели 2 из-за расположения волнообразной алюминиевой фольги под наклоном к наружной стене, за счет создания более узких воздушных прослоек в конструкции панели типа 2, что приводит к уменьшению

конвективного теплообмена Q_k и снижению общего теплообмена в прослойках.

Таблица №2

Результаты расчета теплового потока через наружную стену и
утеплительную панель типа 2

№	t_H	t_B	$t_{пан1}$	t_1	t_2	t_3	$Gr \cdot Pr$	Nu	α_k	$Q_{к2}$	$Q_{л2}$	$Q_{общ2}$	$Q_{эксп2}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	3	19,5	18,3	18,4	10,8	3,3	22447,09	1,42	0,92	6,92	0,08	7,0	8,0
2	-13	17	15,1	14,9	1,3	-12,4	46084,74	1,70	1,10	15,06	0,13	15,2	13,2
3	-7	18,6	17	16,8	5,2	-6,5	38366,10	1,62	1,05	12,28	0,11	12,4	10,9
4	-2	18,7	17,4	17,3	7,8	-1,6	29998,33	1,53	0,99	9,33	0,09	9,4	8,7
5	-6	18,6	16,9	16,9	5,7	-5,5	36576,06	1,60	1,04	11,66	0,11	11,8	11,7
6	4	19,6	18,4	18,5	11,4	4,3	21047,22	1,40	0,91	6,44	0,07	6,5	8,0
7	1	19,3	18,1	18,0	9,7	1,4	25325,28	1,46	0,95	7,91	0,08	8,0	8,0
8	0	19,3	17,9	18,0	9,2	0,4	26923,45	1,49	0,96	8,47	0,09	8,6	9,5
9	-3	18,8	17,3	17,3	7,4	-2,6	31197,80	1,55	1,01	9,99	0,10	10,1	10,2
10	-6	18,5	16,9	16,8	5,6	-5,5	36688,27	1,61	1,04	11,62	0,11	11,7	10,9
11	-12	17,2	15,3	15,2	1,9	-11,4	44679,12	1,69	1,09	14,55	0,13	1,47	13,2
12	2	19,1	18,1	17,9	10,1	2,3	23611,81	1,44	0,93	7,26	0,08	7,3	6,6
13	5	19,7	18,5	18,7	12,0	5,3	19535,34	1,37	0,89	5,96	0,07	6,0	8,0
14	1	19,4	18	18,1	9,7	1,4	25379,93	1,46	0,95	7,96	0,09	8,0	9,5
15	2	19,5	18,1	18,3	10,3	2,3	23751,12	1,44	0,93	7,44	0,08	7,5	9,5
16	-3	19	17,5	17,5	7,5	-2,6	31917,73	1,55	1,01	10,08	0,10	10,2	10,2
17	-6	18,8	17,1	17,1	5,8	-5,5	36515,63	1,60	1,04	11,75	0,11	11,9	11,7
18	-8	18,5	17	16,7	4,6	-7,5	39963,43	1,64	1,06	12,84	0,12	13,0	10,2

По результатам расчета температурного поля, конвективной и лучистой составляющих теплового потока через ограждающую конструкцию построены зависимости общего теплового потока ($Q_{общ} = Q_{л} + Q_{к}$) и теплового потока, полученного при экспериментальном определении термических сопротивлений и коэффициентов теплопроводности утеплительных панелей

$Q_{\text{эксп}}$ от температуры наружного воздуха. Построены соответствующие графики на рис. 2.

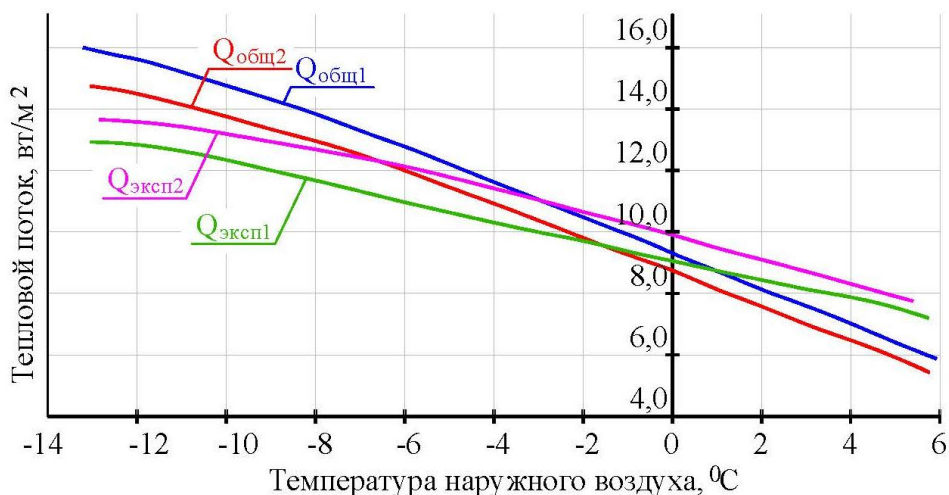


Рис. 2. – Графики зависимости теплового потока ($Q_{\text{общ}}$ и $Q_{\text{эксп}}$) от температуры наружного воздуха t_n для наружной стены с утеплительной панелью

В результате анализа построенных зависимостей можно сделать вывод о достаточном совпадении экспериментальных и расчетных значений теплового потока через наружную стену, утепленную панелями предложенной конструкции со стороны внутренней поверхности.

Выводы по статье:

1. Вопрос о внутреннем утеплении строительных конструкций является актуальным при реконструкции памятников архитектуры, при местном ремонте выявленных теплотехнических дефектов стен, при обеспечении повышенной теплоизоляции помещений, принадлежащим отдельным гражданам;

2. Представленный метод расчета дополнительной теплоизоляции доступен для инженеров проектировщиков и верифицирован экспериментальными данными.

Литература

1. Ливчак В.И. Альтернативная редакция проекта приказа Минстроя России об установлении требований энергетической эффективности зданий и классов энергоэффективности // Инженерные системы, 2022. №3. С. 36–56.

2. Ливчак В.И. Предложения по реализации повышения энергоэффективности зданий ЖКХ в России вопреки действиям Минстроя и Минэкономразвития // Инженерные системы, 2021. №1. С. 28–38.

3. Дмитриев А.Н. Управление энергосберегающими инновациями в строительстве зданий: Учеб. пособие, М.: АСВ, 2000. 310 с.

4. Савин В.К. Строительная физика: энергоперенос, энергоэффективность, энергосбережение. М.: «Лазурь», 2005. 432 с.

5. Дмитриев А.Н., Ковалев И.Н., Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия, М.: АВОК-ПРЕСС. 2005. 120 с.

6. Горшков А.С. Разработка научных и методологических принципов повышения эффективности использования энергетических ресурсов на предприятиях текстильной и легкой промышленности и снижения энергоемкости выпускаемой продукции. Автореферат дисс. докт. техн. наук. СПб, 2019. 32 с.

7. Андреев А.А., Кадокова С.Ю., Стахов А.Е., Фролькис В.А. Экономико-математический анализ тепловой защиты здания // Вестник гражданских инженеров (СПбГАСУ). 2019. №3. С. 107-112.

8. Андреев А.А., Кадокова С.Ю., Стахов А.Е. Методы управления инвестиционными энергосберегающими проектами // Вестник гражданских инженеров (СПбГАСУ). 2020. №4 (81). С. 252-256.

9. Андреев А.А., Стахов А.Е. Энергетическая оценка решений тепловой защиты с позиции жизненного цикла зданий //АВОК. 2020. №4. С. 56-59.
10. Аверьянов В.К., Горшков А.С., Васильев Г.П. Перетоки теплоты между помещениями и варианты их учета // Инженерные системы. 2019. №2. С. 30-37.
11. Иванова Ю.В., Федорова И.В., Кадокова С.Ю. Методы повышения тепловой защиты стеновых конструкций зданий // Инженерный вестник Дона, 2023, №6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8497
12. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий /Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина, - 5-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
13. Теплотехнический справочник в 2 т. Т:2 / Под общ. ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева, - 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1976. 896 с.
14. Богословский В.Н. Строительная теплофизика: (Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во «АВОК Северо-Запад», СПб, 2006. 400 с.

References

1. Livchak, V.I. Inzhenernye sistemy, 2022. №3. pp. 36–56.
2. Livchak, V.I. Inzhenernye sistemy, 2021. №1. pp. 28–38.
3. Dmitriev A.N. Ucheb. Posobie, [Management of energy-saving innovations in the construction of buildings: Textbook. allowance]. M.: ASV, 2000. 310 p.
4. Savin V.K. Stroitel'naja fizika: jenergoperenos, jenergojefektivnost', jenergoberezhenie [Construction Physics: Energy Transfer, Energy Efficiency, Energy Saving]. M.: «Lazur», 2005. 432 p.
5. Dmitriev A.N., Kovalev I.N., Tabunshnikov Ju.A., Shilkin N.V. Rukovodstvo po ocenke jefektivnosti investicij v jenergoberegajushhie

meroprijatija [Guidelines for assessing the effectiveness of investments in energy-saving measures]. M.: AVOK-PRESS, 2005. 120 p.

6. Gorshkov A.S. Razrabotka nauchnyh i metodologicheskikh principov povysheniya jeffektivnosti ispol'zovaniya jenergeticheskikh resursov na predpriyatijah tekstil'noj i legkoj promyshlennosti i snizhenija jenergoemkosti vypuskaemoj produkcii. Avtoreferat diss. dokt. tehn. nauk [Development of scientific and methodological principles for improving the efficiency of the use of energy resources at textile and light industry enterprises and reducing the energy intensity of products. Abstract of the dissertation. Doc. techn. Sciences]. St. Petersburg. 2019. 32 p.

7. Andreenko A.A., Kadokova S.Ju., Stahov A.E., Frol'kis V.A. Vestnik grazhdanskih inzhenerov (SPbGASU), 2019. №3. pp.107-112.

8. Andreenko A.A., Kadokova S.Ju., Stahov A.E. Vestnik grazhdanskih inzhenerov (SPbGASU), 2020. №4 (81). pp. 252-256.

9. Andreenko A.A., Stahov A.E. AVOK, 2020. №4. pp. 56-59.

10. Aver'janov V.K., Gorshkov A.S., Vasil'ev G.P. Inzhenernye sistemy. 2019, №2. pp. 30-37.

11. Ivanova Yu.V., Fedorova I.V., Kadokova S.Yu. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2023. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8497.

12. Fokin K.F. Stroitel'naja teplotehnika ograzhdajushhih chastej zdaniy. Pod red. Tabunshnikov Ju.A., Gagarina V.G. [Construction heat engineering of the enclosing parts of buildings]. 5-e izd., peresmotr. M.: AVOK-PRESS, 2006. 256 p.

13. Teplotehnik spravochnik v 2 t. T: 2. Pod obshh. red. V.N. Jureneva i P.D. Lebedeva, 2-e izd., pererab. [Thermotechnical reference book in 2 volumes. T: 2/ Under the general editorship of V.N. Yurenev and P.D. Lebedev]. M.: Energy, 1976. 896 p.

14. Bogoslovskij V.N. Stroitel'naja teplofizika: (Teplofizicheskie osnovy otoplenija, ventiljacii i kondicionirovanija vozduha). 3-e izd., pererab. i dop.



[Building thermophysics: (Thermophysical fundamentals of heating, ventilation and air conditioning)]. St. Petersburg: Publishing house "ABOK North-West", 2006. 400 p.

Дата поступления: 28.01.2024

Дата публикации: 13.03.2024