Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения

О.Д. Самарин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Продолжение исследований в области расчета скорости остывания помещений с целью получения зависимостей, которые являются достаточно точными и учитывающими большинство существенных для задачи факторов, но в то же время имеющих инженерный вид, представляется до сих пор актуальным. Цель работы — поиск зависимости температуры помещений здания от времени в начальный период после отключения теплоснабжения в аварийном режиме. В качестве научной гипотезы рассматривается положение об экспоненциальном характере данной зависимости.

Материалы и методы. Используются и проанализированы основные уравнения, связывающие наиболее важные составляющие теплового потока в остывающем помещении в условиях прекращения подачи теплоты отопительными приборами. Реализована численная модель нестационарного теплового режима вентилируемого помещения на основе решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности и теплообмена на поверхностях помещения.

Результаты. Получено аналитическое выражение для скорости остывания помещения при отключении теплоснабжения, имеющее вид экспоненциальной функции от корня квадратного из времени с момента аварии. Определено расчетное время остывания до выпадения конденсата на внутренней поверхности ограждающих конструкций на примере одного из существующих жилых зданий в климатических условиях г. Москвы с учетом конструктивных характеристик здания и нормируемого расхода приточного воздуха.

Выводы. Показано, что на остывание здания в начальный период влияет главным образом соотношение теплового потока, связанного с неорганизованным воздухообменом, и теплопотерь в окружающую среду через «легкие» ограждающие конструкции. Обнаружено, что учет снижения естественного воздухообмена при охлаждении здания приводит к некоторому замедлению снижения температуры, но оно не является решающим. Установлено, что применение герметичных заполнений световых проемов, например, в пластиковых переплетах, в обычных условиях ухудшающее санитарно-гигиеническую обстановку в помещениях, в аварийных режимах увеличивает располагаемый интервал времени для восстановления теплоснабжения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность и безопасность теплоснабжения, внутренний микроклимат, температура, остывание, теплопередача, температурная волна, теплопоступления, воздухообмен, уравнение баланса, аварийный режим

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 496–501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501

The calculation of building cooling under emergency conditions to ensure their heating reliability

Oleg D. Samarin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Continuation of research in the area of premise cooling rate calculation with the aim of obtaining dependencies, which are sufficiently accurate and take into account the most of the factors essential for the problem, but at the same time having an engineering form, is still relevant. The purpose of the study is the search for a dependence of the temperature in the building premises on time in the initial period after heat supply shutdown at emergency mode. Exponential nature of this dependence is considered as a scientific hypothesis.

Materials and methods. The basic equations connecting the most important components of a heat flow in a cooling room under condition of the termination of heat supply from heating devices are used and analysed in the study. A numerical model of non-stationary thermal regime of the ventilated room is implemented on the base of the solution of a differential equations system of heat conduction and heat transfer on the surfaces of the room.

Results. An analytical expression is obtained for the room cooling rate when the heat supply is disconnected, which has the form of an exponential function of square root of time since the accident. The cooling time before the condensation on the inner surface of the enclosure is determined by the example of a currently existing residential building under climatic conditions of Moscow, accounting the structural characteristics of the building and normalized fresh-air flow rate.

Conclusions. It is shown that the building cooling in the initial period is influenced mainly by the ratio of the heat flux associated with unorganized air exchange and the heat loss to the environment through "light" enclosure. It was found that the

decrease of natural air exchange in the building cooling process leads to a certain slowdown in the decrease of temperature, but it is not decisive. It is understood that the use of airtight light opening fillers, for example, in plastic casement, under normal conditions aggravating the sanitary and hygienic situation in the premises, under emergency conditions increases the available time interval for the restoration of heat supply.

KEYWORDS: heat supply reliability and safety, internal microclimate, temperature, cooling, heat transfer, temperature wave, heat supply, air exchange, balance equation, emergency mode

FOR CITATION: Samarin O.D. The calculation of building cooling under emergency conditions to ensure their heating reliability. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:4:496-501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Поддержание надежности и безопасности теплоснабжения, в первую очередь для жилых зданий как объектов с постоянным пребыванием людей, наряду с обеспечением необходимого уровня комфорта параметров внутреннего микроклимата в помещениях является наиболее важной задачей в соответствии с требованиями Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Применительно к гражданским зданиям требования безопасности сводятся в основном к недопущению конденсации водяных паров на внутренней поверхности ограждений помещений, для чего необходимо, чтобы температура этих поверхностей не становилась ниже температуры точки росы внутреннего воздуха t_p , °C.

Предмет исследования настоящей работы — способы расчета остывания зданий в аварийных режимах при отключении теплоснабжения для определения промежутка времени, доступного для проведения ремонтных работ, при условии выполнения требований безопасности жизнедеятельности. В качестве цели исследования будем рассматривать поиск зависимости температуры помещений здания от времени в начальный период после отключения теплоснабжения.

Задача о расчете остывания помещений решалась рядом ученых, преимущественно отечественных, с различных позиций. Так, в монографиях [1, 2] приводятся упрощенные аналитические решения, но они касаются главным образом изолированных ограждающих конструкций, без учета теплового баланса помещения в целом. То же относится к предыдущей работе автора [3], хотя в ней была предпринята попытка уточнения существующих зависимостей, в том числе за счет использования численных методов. Нужно отметить, что большинство таких зависимостей имеет экспоненциальный характер в соответствии с особенностями дифференциального уравнения теплопроводности. В последнее время появляются и более комплексные исследования, в первую очередь [4–6], но их результаты представляются несколько усложненными

для непосредственного применения в инженерной практике. Одновременно расширяется использование численных методов для анализа переходных и аварийных режимов и их моделирования [7, 8]. Особенно это характерно для зарубежных авторов [9–11], с учетом того, что рассматриваемая задача вообще за рубежом представляется менее актуальной в силу более ограниченного распространения централизованного теплоснабжения. В то же время существует ряд работ [19], в которых расчет остывания и вообще нестационарной теплопроводности материалов рассматривается как аналитически, так и численно, но применительно не к помещению, а к обработке строительных материалов [12, 13]; ограждающим конструкциям [14, 15]; расчету энергопотребления зданий [16, 17] и другим технологическим процессам, например, производству композиционных материалов [18]; а также к теплообменным аппаратам [19], и их результаты в определенной степени могут быть использованы при решении рассматриваемой задачи. Это же относится и к предыдущей работе автора [20]. Таким образом, продолжение исследований в данной области с целью получения зависимостей, которые являются достаточно точными и учитывающими большинство существенных для задачи факторов, но в то же время имеющих инженерный вид, представляется для нас пор актуальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Покажем, как можно получить достаточно простое по форме выражение для расчета охлаждения здания при прекращении подачи теплоты с целью выявления имеющегося резерва времени для восстановления теплоснабжения. Поскольку очевидно, что в процессе остывания температура внутреннего воздуха t_b , °C, будет постепенно стремиться к значению наружной температуры t_n , °C, расчет охлаждения удобно вести для избыточной температуры $\theta_b = t_b - t_n$. В этом случае начальную величину θ_b при отключении теплоснабжения можно обозначить как θ_0 . Известно [1, 2], что поскольку в рассматриваемых условиях теплоступления в по-

мещения от отопительных приборов практически сразу оказываются нулевыми, значение t_b очень быстро сравнивается с температурой на внутренней поверхности ограждающих конструкций здания. Тогда для текущего уровня θ_b в момент времени τ , с, с начала остывания можно записать дифференциальное уравнение, выражающее баланс трех основных составляющих теплового потока. Речь идет о теплоте, уходящей из здания с вентиляционным воздухом и через «легкие», т.е. безынерционные наружные ограждения, в качестве которых можно рассматривать в первую очередь заполнения световых проемов; и о выделяющейся в помещении из «массивных» конструкций. Ими в первом приближении являются наружные стены, покрытия и перекрытия над неотапливаемыми подвалами. Такой баланс возможно рассматривать в первые часы, когда еще можно пренебречь непосредственным стоком теплоты из «массивных» ограждений в окружающую среду. В этом случае уравнение баланса будет выглядеть следующим образом:

$$A\theta_b + B\sqrt{\tau} \frac{d\theta_b}{d\tau} = 0. \quad (1)$$

Параметр A можно определить по выражению

$$A = L_n c_b \rho_b / 3,6 + \Sigma K_i A_{ni}, \quad (2)$$

где L_n — расход приточного воздуха, м³/ч; $c_b = 1,005$ кДж/(кг · К) и $\rho_b = 1,2$ кг/м³ — соответственно его удельная теплоемкость и плотность. Для жилых зданий величину L_n можно принимать по санитарной норме из расчета 3 м³/ч на 1 м² жилой площади. При записи выражения (1) предполагается, что поступление воздуха обеспечивается естественной вентиляцией без подогрева, как это чаще всего происходит в объектах жилищного строительства вплоть до настоящего времени, тем более что при наличии механического притока в аварийном режиме произойдет его отключение. Нужно, правда, заметить, что тогда по мере понижения t_b значение L_n тоже будет постепенно падать из-за уменьшения располагаемого гравитационного давления, пропорционального θ_b . Однако этим эффектом можно пренебречь, и в таком случае мы получим несколько завышенную скорость остывания, что можно рассматривать как запас расчета. Слагаемое $\Sigma K_i A_{ni}$ представляет собой суммарную тепловую проводимость «легких» ограждений. При этом K_i и A_{ni} — соответственно коэффициенты теплопередачи, Вт/(м² · К), и площади, м², i -й светопрозрачной конструкции.

Параметр B вычисляется следующим образом:

$$B = \Sigma A_n \sqrt{\lambda c \rho}. \quad (3)$$

В данном выражении λ , c и ρ — это соответственно теплопроводность, Вт/(м · К), удельная теплоемкость, Дж/(кг · К), и плотность материала слоя наружной стены, покрытия или перекрытия над подвалом, а также в некоторых случаях вну-

тренних конструкций, обращенных внутрь помещений здания; ΣA_n — суммарная площадь перечисленных ограждений, м², для помещения или здания в целом. Выражение для параметра B получается, исходя из предположения, что в начальный период времени температурная волна, образующаяся при остывании здания, успевает проникнуть только в рассматриваемый слой. При этом учитывается, что глубина проникновения этой волны составляет примерно $3,6\sqrt{a\tau}$, где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$, м²/с — коэффициент

температуропроводности материала, откуда, если считать температурное поле в пределах волны приближенно параболическим, и определяется числовой коэффициент в формуле для B , равный в данном случае единице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Интегрирование (1) дает зависимость для θ_b в следующей форме:

$$\theta_b = \theta_0 \exp\left(\frac{-2A}{B}\sqrt{\tau}\right). \quad (4)$$

Таким образом, гипотеза об экспоненциальном характере убывания избыточной температуры подтверждается, только в начальный период аргумент экспоненты оказывается пропорциональным корню квадратному из времени с начала остывания.

В качестве примера можно провести вычисления для некоторого жилого помещения, расположенного на промежуточном этаже. Начальные условия приняты равными $t_b = +20$ °С, $t_n = -25$ °С в соответствии с действующими нормативами на параметры внутреннего и наружного климата. Величина $\Sigma K_i A_{ni} = 4$ Вт/К и параметр $B = 7\sqrt{0,22 \cdot 840 \cdot 500} = 2128$ Вт/К учитывались в соответствии с конструктивными характеристиками здания. Исходное распределение температур по сечению наружной стены было выбрано соответствующим стационарному режиму при условии полной компенсации системой теплоснабжения теплопотерь помещения.

Результаты расчетов для нескольких режимов приведены на рис. 1. Нижние кривые показывают ход охлаждения при $L_n = 42$ м³/ч, вычисленном по санитарной норме при площади помещения 14 м², верхние — для сравнения при $L_n = 0$. В обоих случаях данные, получаемые по уравнению (2), изображены пунктиром, а сплошной линией отмечены результаты численного моделирования с помощью разработанной автором программы для ЭВМ, непосредственно решающей систему дифференциальных уравнений нестационарной теплопередачи в ограждениях и теплообмена на их поверхностях [3]. Данная программа позволяет приближенно учесть уменьшение L_n с течением времени, соответствующая кривая показана мелким пунктиром. Нетрудно убедиться, что данный эффект

Рис. 1. Зависимость t_b от времени для расчетного помещения

Fig. 1. Dependence of t_{in} on time for the design room

действительно несколько замедляет остывание, но не слишком заметно — увеличение времени достижения того или иного уровня t_b составляет порядка 20 %. Следует также заметить, что значение отношения $-2A/B$ в формуле (4) требует уточнения по результатам сопоставления с численными расчетами, что и было сделано при построении рис. 1, поскольку влияние теплоаккумуляции внутренних ограждений на остывание учесть теоретически достаточно сложно. Однако можно показать, что существенных качественных расхождений при этом в любом случае получаться не будет.

Поскольку точка росы при $t_b = +20$ °C и относительной влажности внутреннего воздуха, равной 55 %, принимаемой по СП 50.13330.2012 для расчета ограждающих конструкций в жилых зданиях, составляет примерно +11 °C, получаем, что в условиях рассматриваемой задачи время остывания при $L_n = 42$ м³/ч составляет всего около 1,5 ч. Если же прекратить воздухообмен, что, в принципе, возможно в условиях установки современных оконных блоков с герметичными переплетами, этот срок может быть значительно увеличен. Некоторое снижение качества внутреннего воздуха в течение этого периода не является критическим с учетом решения более существенной задачи по обеспечению безопасности теплоснабжения и конструкций здания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования в целом подтверждена первоначальная гипотеза об экспоненциальном

характере убывания избыточной температуры в здании, однако необходимо отметить, что в начальный период остывания аргумент экспоненты оказывается пропорционален корню квадратному из времени с момента начала остывания. Это объясняется характером распространения температурной волны в конструкциях ограждений помещения при малых моментах времени. Кроме того, можно сделать следующие выводы:

- на остывание здания в аварийных режимах теплоснабжения в начальный период влияет главным образом соотношение теплового потока, связанного с неорганизованным воздухообменом, и теплопотерь в окружающую среду через «легкие» ограждающие конструкции;
- учет снижения естественного воздухообмена в процессе охлаждения здания приводит к некоторому замедлению снижения температуры, но оно не является решающим;
- применение герметичных заполнений световых проемов, например, в пластиковых переплетах, в обычных условиях ухудшающее санитарно-гигиеническую обстановку в помещениях, в аварийных режимах увеличивает располагаемый интервал времени для восстановления теплоснабжения.

Дальнейшее развитие предлагаемого исследования может быть связано с уточнением временного диапазона, для которого полученная зависимость будет справедлива, а также влияния теплоаккумуляции внутренних ограждений на остывание путем сопоставления с результатами численных расчетов для серии помещений различных зданий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кувшинов Ю.Я. Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий. М. : МГСУ — Изд-во АСВ, 2010. 319 с.
2. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. 5-е изд., пересмотр. М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. 256 с.
3. Самарин О.Д. О расчете охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 2. С. 46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (дата обращения: 04.12.18).
4. Рафальская Т.А. Энергетическая безопасность теплоснабжения при аварийном режиме отпуски теплоты от ТЭЦ // Промышленная энергетика. 2016. № 11. С. 23–27.
5. Рафальская Т.А., Березка А.К., Савенков А.А. Теоретическое исследование теплозащиты ограждающих конструкций зданий при аварийном теплоснабжении // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : мат. X Всерос. науч.-техн. конф, 11–13 апреля 2017 г., г. Новосибирск. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2017. С. 213–218.
6. Rafalskaya T.A. Reliability and controllability of systems of centralized heat supply // Eastern European Scientific Journal. 2016. No. 2. Pp. 228–235. DOI: 10.12851/EESJ201604C06ART10
7. Малявина Е.Г. Расчет темпа остывания помещения после отключения теплоснабжения // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 2. С. 55–58. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22957995_69408242.pdf (дата обращения: 04.12.18).
8. Дорошенко А.В. Имитационная термодинамическая модель здания // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 12 (1000). С. 42–43.
9. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2016. Vol. 2. No. 1. Pp. 12–24. DOI: 10.15826/rjctst.2016.1.002
10. Gabrielaitiene I. Numerical simulation of a district heating system with emphases on transient temperature behavior // Proceedings of the 8th International Conference «Environmental Engineering». Vilnius : VGTU Publishers, 2011. Vol. 2. Pp. 747–754.
11. Horikiri K., Yao Y., Yao J. Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment // Building and Environment. 2014. Vol. 77. Pp. 135–147. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.027
12. Tae Sup Yun, Yeon Jong Jeong, Tong-Seok Han, Kwang-Soo Youm. Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes // Energy and Buildings. 2013. Vol. 61. Pp. 125–132. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.043
13. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Боровкова Т.В. Алгоритм решения обобщенной задачи нестационарной теплопроводности в телах простой геометрической формы // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 1. С. 112–128.
14. Liu C.-S. An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. Pp. 943–953. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.003
15. Jedinák R. Energy efficiency of building envelopes // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 855. Pp. 39–42.
16. Naji S., Shamshirband S., Basser H., Keivani A., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. et al. Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. Pp. 1520–1528. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.062
17. Hani A., Koiv T.-A. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings // Smart Grid and Renewable Energy. 2012. Vol. 3. Issue 3. Pp. 231–238. DOI: 10.4236/sgre.2012.33032
18. Акимов И.А., Акимов А.И., Каракулина Е.О. Исследование теплопередачи в многослойных цилиндрических изделиях на первом этапе производства композиционных материалов // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 68–72.
19. Остапенко В.В., Лукьянов А.В., Дремов В.В. Модель работы кожухотрубного аккумулятора теплоты фазового перехода на основе решения задачи Стефана // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5. С. 89–93.
20. Samarina O.D. The temperature waves motion in hollow thick-walled cylinder // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 2. Pp. 161–168. DOI: 10.18720/MCE.78.13

Поступила в редакцию 28 ноября 2018 г.

Принята в доработанном виде 4 декабря 2018 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: Самарин Олег Дмитриевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, samarinod@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Kuvshinov Yu.Ya. *Energy saving in the building microclimate system*. Moscow, MGSU — ASV Publ., 2010; 319. (rus.).
2. Fokin K.F. *Thermal physics of building envelopes* / ed. of Yu.A. Tabunshchikov, V.G. Gagarin. 5th ed., revised. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2006; 256. (rus.).
3. Samarin O.D. On calculation of external walls coling in emergency condition of heat supply. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction*. 2007; 2:46–50. URL: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publication/fulltext/2-2007.pdf> (date of treatment: 04.12.18). (rus.).
4. Rafalskaya T.A. Energy security of heat supply in emergency regime of the release of heat from the cogeneration plant. *Industrial power-engineering*. 2016; 11:23–27. (rus.).
5. Rafalskaya T.A., Beryozka A.K., Savenkov A.A. Theoretical study of thermal protection of building envelopes in case of emergency heat supply. *Topical issues of architecture and construction : proceedings of the X All-Russian scientific and technical conference, 11–13 April 2017, Novosibirsk*. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin) Publ., 2017; 213–218. (rus.).
6. Rafalskaya T.A. Reliability and controllability of systems of centralized heat supply. *Eastern European Scientific Journal*. 2016; 2:228–235. DOI: 10.12851/EESJ201604C06ART10
7. Malyavina E.G. Calculation of the rate of cooling of a room after turning off the heat supply. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 2:55–58. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22957995_69408242.pdf (date of treatment: 04.12.18) (rus.).
8. Doroshenko A.V. Simulation thermodynamic model of a building. *Bulletin of construction equipment*. 2017; 12(1000):42–43. (rus.).
9. De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A. Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2016; 2(1):12–24. DOI: 10.15826/rjct.2016.1.002
10. Gabrielaitiene I. Numerical simulation of a district heating system with emphases on transient temperature behavior. *Proceedings of the 8th International Conference “Environmental Engineering”*. Vilnius, VGTU Publ., 2011; 2:747–754.
11. Horikiri K., Yao Y., Yao J. Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment. *Building and Environment*. 2014; 77:135–147. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.03.027
12. Tae Sup Yun, Yeon Jong Jeong, Tong-Seok Han, Kwang-Soo Youm. Evaluation of thermal conductivity for thermally insulated concretes. *Energy and Buildings*. 2013; 61:125–132. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.01.043
13. Eliseev V.N., Tovstonog V.A., Borovkova T.V. Solution algorithm of generalized non-stationary heat conduction problem in the bodies of simple geometric shapes. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.* 2017; 1:112–128. (rus.).
14. Liu C.-S. An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 97:943–953. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.003
15. Jedinák R. Energy efficiency of building envelopes. *Advanced Materials Research*. 2013; 855:39–42.
16. Naji S., Shamshirband S., Bassar H., Keivani A., Alengaram U.J., Jumaat M.Z. et al. Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 53:1520–1528. DOI: 10.1016/j.rser.2015.09.062
17. Hani A., Koiv T.-A. Energy consumption monitoring analysis for residential, educational and public buildings. *Smart Grid and Renewable Energy*. 2012; 3:(3):231–238. DOI: 10.4236/sgre.2012.33032
18. Akimov I.A., Akimov A.I., Karakulina E.O. Investigation of heat transfer in multy-layer cylindrical products at the first step of production of composite materials. *Scientific and technical herald of the Volga region*. 2015; 2:68–72. (rus.).
19. Ostapenko V.V., Lukjanov A.V., Dryomov V.V. Model of work tube type phase transition heat accumulator by solving the Stephan problem. *Herald of the Voronezh State Tech. Univ.* 2014; 10(5):89–93. (rus.).
20. Samarin O.D. The temperature waves motion in hollow thick-walled cylinder. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 2:161–168. DOI: 10.18720/MCE.78.13

Received November 28, 2018

Adopted in a revised form on December 4, 2018

Approved for publication March 29, 2019

ABOUT THE AUTHOR: **Oleg D. Samarin** — Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of Department of the Heat and Gas Supply and Ventilation, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, samarinod@mgsu.ru.