

**Для цитирования:** Т.А. Рафальская. Влияние влагонакоплений в наружных стенах на тепловой режим помещений при аварийном теплоснабжении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021;48(2):113-123. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123

**For citation:** T.A. Rafalskaya. Effects of moisture accumulation in outer walls on thermal mode of premises in case of emergency heat supply. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(2):113-123. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 626.862.7

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123

### ВЛИЯНИЕ ВЛАГОНАКОПЛЕНИЙ В НАРУЖНЫХ СТЕНАХ НА ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНОМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

*Т.А. Рафальская*

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),  
630008, г. Новосибирск-8, ул. Ленинградская, 113, Россия

**Резюме.** Цель. При связанной подаче теплоты в системе теплоснабжения, строительные конструкции выполняют роль теплового аккумулятора. Поэтому при расчете времени остывания помещений при авариях в теплосети необходимо учитывать не только погодные условия, но также снижение поступления тепла от системы теплоснабжения, поскольку при низких температурах наружного воздуха потери теплоты помещениями будут больше тепlopоступлений от системы теплоснабжения, что приведет к накоплению влаги в материалах конструкций. **Метод.** Для построения модели внутреннего режима помещений в аварийном режиме работы системы теплоснабжения применена теория потенциала влажности, позволяющая рассчитать влажностный режим строительных конструкций при различных непериодических воздействиях. **Результат.** Предложена методика расчета влагонакоплений в наружных стенах жилых помещений с применением теории потенциала влажности. **Вывод.** Определено влияние влагонакоплений на тепловую аккумуляцию наружных стен и динамику температуры внутреннего воздуха помещений в аварийных условиях работы системы теплоснабжения.

**Ключевые слова:** потенциал влажности, тепловой режим помещений, аварийное теплоснабжение

### EFFECTS OF MOISTURE ACCUMULATION IN OUTER WALLS ON THERMAL MODE OF PREMISES IN CASE OF EMERGENCY HEAT SUPPLY

*T.A. Rafalskaya*

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),  
113 Leningradskaya Str., Novosibirsk-8 630008, Russia

**Abstract. Objective.** In the case of a coupled supply of heat in a heat supply system, engineering structures act as a heat accumulator. Therefore, when calculating the premises cooling time in case of accidents in a heating network, it is necessary to take into account not only weather conditions, but also a decrease in the flow of heat from the heat supply system, since at low outside temperatures the heat loss in premises is greater than the heat supply, which will lead to the accumulation of moisture in materials of the structures. **Methods.** To build a model of internal conditions in premises when the heat supply system operates in emergency mode, the humidity potential theory was applied, which allows calculating the humidity mode of engineering structures under various non-periodic exposures. **Results.** A method for calculating moisture accumulation in outer walls of residential premises using the moisture potential theory is proposed. **Conclusion.** The impact of moisture accumulation on heat accumulation in outer walls and the dynamics of internal air temperature in premises under emergency conditions of the heat supply system operation has been determined.

**Keywords:** humidity potential, thermal conditions in premises, emergency heat supply

**Введение.** В современных тепловых пунктах систем централизованного теплоснабжения применяется связанная подача теплоты, позволяющая значительно сократить расход воды в

теплосети. В этом случае при максимальном водопотреблении, для нагрева воды на горячее водоснабжение используется часть расхода воды, предназначенного для системы отопления; при отсутствии водопотребления в систему отопления можно подать расход воды больше требуемого для восстановления её тепловой мощности. В системах теплоснабжения со связанной подачей теплоты необходимо учитывать не только изменение температуры наружного воздуха, но и снижение поступления тепловой энергии от тепловой сети. При понижении температуры наружного воздуха система отопления не может компенсировать теплопотери помещений, что приведет к переувлажнению материалов конструкций. В аварийных условиях при охлаждении наружных стен необходимо учитывать фазовый переход влаги в толще наружных ограждений, который замедляет остывание наружных стен за счет тепловыделений при замерзании воды [1].

**Постановка задачи.** Обозначенные проблемы вызывают необходимость разработки комплексной методики, которая позволит выполнить количественную оценку содержания влаги в материалах строительных конструкций, находящейся в любом фазовом состоянии, а также оценить влияние влагонакоплений в стенах на температуру внутреннего воздуха помещений. Сопротивление проникновению влаги в ограждающие конструкции определяется по СП 50.13330.2012 (акт.: 01.02.2020) «Тепловая защита зданий» по предельно допустимому увлажнению материалов при определении максимального увлажнения. В балансовых уравнениях этой методики не учитывается изменение температуры и относительной влажности внутреннего воздуха, которые принимаются постоянными в течение года [2], в том числе, в аварийных условиях работы системы теплоснабжения. Кроме того, влагонакопления влияют на термическое сопротивление и теплоустойчивость наружных ограждений, и, следовательно, на температуру внутреннего воздуха [3-5].

**Методы исследования.** К.Ф. Фокиным [6] был разработан метод на основе диффузии водяного пара за счет разности парциальных давлений с наружной и внутренней сторон ограждения. Этот метод позволяет определить область конденсации влаги в толще наружного ограждения, но не показывает, в каком фазовом состоянии находится влага, является ли влажность материала сорбционной или сверхсорбционной.

В.Н. Богословским была разработана теория потенциала влажности [7], но не была предложена последовательная методика расчета влагонакоплений. В отличие от широко применяемой теории, основанной на диффузии водяного пара [6], теория потенциала влажности позволяет рассчитать количество влаги, находящейся в любой фазе и при различных нестационарных воздействиях. Указанные особенности обусловили выбор именно теории потенциала влажности для построения модели теплового режима помещений в аварийном режиме работы системы теплоснабжения.

**Определение влагонакоплений в конструкциях стен с применением теории потенциала влажности.** Совместный тепло- и влагоперенос в конструкции может быть представлен системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_{\delta}}{\partial \tau} = a_i \operatorname{div} \left( \frac{\partial t_{\delta}}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial e_{\delta}}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\rho \xi_0} E_{\delta} \frac{\partial^2 e_{\delta}}{\partial x^2}, \end{cases}, \quad (1)$$

где  $e_{\delta}$  –упругость водяного пара в порах строительных материалов, Па;  $E_{\delta}$  – максимальная упругость водяного пара, Па, при температуре  $t_{\delta}$ ;  $\mu$  – коэффициент паропроницаемости слоя материала, мг/(м·ч·Па),  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi_0$  – относительная пароемкость материала;  $a_i$  – температуропроводность материала слоя, м<sup>2</sup>/с.

Решение первого уравнения системы уравнений (1) в конечно-разностной форме для каждой точки  $i$  многослойного наружного ограждения для стационарных условий:

$$t_{\delta i} = t_{int} - \frac{t_{int} - t_{ext}}{R_0} (R_{int} + \sum R_i), \quad (2)$$

где  $R_0$ ,  $R_{int}$ ,  $R_{ext}$  – термическое сопротивление,  $m^2 \cdot K/Wt$ , строительной конструкции, внутреннего воздуха и наружного воздуха, соответственно.

Решением второго уравнения системы (1) будет уравнение, определяющее значения упругости водяного пара в толще стены:

$$e_{\delta_i} = e_{int} - \frac{e_{int} - e_{ext}}{R_{\mu}} (R_{\mu}^{int} + \sum R_{\mu}), \quad (3)$$

где  $e_{int}$  и  $e_{ext}$  – действительные упругости водяного пара в помещении и с наружной стороны ограждения, определяются по формулам:

$$e_{int} = \frac{E_{int} \varphi_{int}}{100}; \quad e_{ext} = \frac{E_{ext} \varphi_{ext}}{100}, \quad (4 \text{ а,б})$$

где  $E_{int}$ ,  $E_{ext}$  – максимальная упругость водяного пара во внутреннем и наружном воздухе, Па;  $\varphi_{int}$  и  $\varphi_{ext}$  – относительная влажность внутреннего и наружного воздуха.

$R_{\mu}$  – сопротивление паропроницанию ограждения,  $m^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}$  [6, 7]:

$$R_{\mu} = R_{\mu}^{int} + \sum_{l=1}^N \frac{\delta_l}{\mu_l} + R_{\mu}^{ext}, \quad (5)$$

$N$  – количество слоёв.

$R_{\mu}^{int}$ ,  $R_{\mu}^{ext}$  – сопротивления влагообмену у внутренней и наружной стороны стены, определяются по формулам В.М. Ильинского:

$$R_{\mu}^{int} = 1 - \frac{\varphi_{int}}{100}; \quad R_{\mu}^{ext} = 1 - \frac{\varphi_{ext}}{100}. \quad (6 \text{ а,б})$$

Влага будет конденсироваться в толще ограждения при выполнении условия:

$$e_{\delta} \geq E_{\delta}. \quad (7)$$

Уравнение (3) позволяет установить количество накапливающегося конденсата при условии, что жидкая влага неподвижна. Перемещение влаги при сверхгигроскопической влажности можно определить, используя уравнения теории потенциала влажности.

Потенциал влажности, позволяющий учитывать движение влаги, как в парообразной, так и в жидкой фазе, был разработан В.Г. Гагариным, В.В. Козловым, К.П. Зубаревым [8]. Наибольшую сложность вызывает построение годового изменения потенциала влажности, зависящего от текущей температуры, относительной влажности наружного воздуха, скорости ветра, величины и продолжительности осадков и солнечной радиации [7]. Помимо этого, коэффициенты влагопроводности строительных материалов зависят от климатических условий местности и индивидуальны для каждого города; определялись они в основном только экспериментально для некоторых материалов ограждений [7, 9, 10]. Влажностный режим в наружных ограждениях зданий на основе потенциала влажности для нестационарных условий можно описать дифференциальным уравнением [11]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_0 \operatorname{div} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - a_0 \delta_i \operatorname{div} \left( \frac{\partial t_{\delta}}{\partial x} \right). \quad (8)$$

где  $a_0$ ,  $m^2/^\circ B$  – коэффициент потенциалопроводности влаги;  $\theta$  – потенциал влажности,  $^\circ B$ , в соответствии со шкалой потенциала влажности, в которой изменение равновесной объёмной концентрации водяного пара на 0,01 равно  $1^\circ B$  [10].

Поток влаги в изотермических условиях уравнивается теплопроводностью. Уравнение (8) в конечно-разностной форме будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\Delta \theta}{R_0} = \delta_i \frac{\Delta t_{\delta}}{R_0}, \quad (9)$$

где  $R_0$  – сопротивление влагопередаче,  $^\circ B/m$ ;  $\Delta \theta = (\theta_i - \theta_{ext})$ ,  $^\circ B$ ;  $\Delta t_{\delta} = (t_{\delta i} - t_{ext})$ ,  $^\circ C$ .

Учитывая, что потенциал влажности является комплексным параметром, зависящим от ряда климатических характеристик, представляется целесообразным для внутреннего воздуха определять  $\theta_{int}$  на основе аналитических зависимостей предложенных в работе [12]:

$$\lg \theta_{int} = 0,057d + 1,056, \quad (10)$$

при  $t_{int} > 5^\circ\text{C}$  и  $\varphi < 80\%$ ,  $0 < d < 20$ .

Влагосодержание воздуха  $d$ , г/кг, определяется из формулы [12, 13]

$$\varphi = k_t d, \quad (11)$$

в которой коэффициент  $k_t$  зависит от температуры воздуха [13]:

$$k_t = 24,39e^{-0,062t}. \quad (12)$$

При вычислении потенциала влажности наружного воздуха необходимо дополнительно учитывать интенсивность солнечной радиации  $q_r$ , кДж/(м<sup>2</sup>·ч) и подвижность воздуха,  $v$ , м/с. Поэтому расчет  $\theta_{ext}$  ведется по зависимостям, предложенным в [7, 14]:

$$\begin{cases} \theta_{ext} = -3,81 + 0,195t_{ext} + 0,164\varphi - 0,0113q_r - 0,035v, & \text{при } t_{ext} \leq -20^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = 6,027 + 0,227t_{ext} + 0,46\varphi - 0,006q_r - 0,0483v, & \text{при } -20 \leq t_{ext} \leq -10^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = 2,86 + 0,219t_{ext} + 0,0965\varphi - 0,0146q_r - 0,0081v, & \text{при } -10 \leq t_{ext} \leq 0^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = -4,01 + 0,448t_{ext} + 0,169\varphi - 0,0196q_r - 0,001651v, & \text{при } 0 \leq t_{ext} \leq 10^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = -13,6 + 1,22t_{ext} + 0,204\varphi - 0,01089q_r - 0,022v, & \text{при } 10 \leq t_{ext} \leq 20^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (13)$$

Из условия равенства удельных потоков потенциалов влажности определяется разность  $\Delta\theta$ :

$$\theta_i - \theta_{ext} = \frac{(\theta_{int} - \theta_{ext})R_9}{\sum R_{9i}}, \quad (14)$$

где  $R_9$  – сопротивление влагопередаче наружного ограждения, м<sup>2</sup>·с·(кДж/кг)/кг, находится по формуле [15, 16]:

$$R_9 = \sum_{i=1}^n (\delta_i / \chi_i), \quad (15)$$

где  $\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя наружного ограждения, м;  $\chi_i$  – коэффициент влагопроводности материала  $i$ -го слоя, кг/(м·ч·°В);  $n$  – число слоёв в ограждающей конструкции.

Применение теории потенциала влажности для расчета влагонакоплений в наружных ограждениях позволяет наиболее полно учесть особенности влагопереноса. Однако на практике применение этой теории затруднено, поскольку коэффициенты теплопроводности строительных материалов будут индивидуальны для каждого города. В.Н. Богословским [7, 13] приводится экспериментальная зависимость коэффициента влагопроводности  $\chi$  от потенциала влажности  $\theta$  только для кирпича и пенобетона. Однако даже для этих материалов полученные коэффициенты будут справедливы только для условий г. Москва. Аналитически определить коэффициент влагопроводности различных строительных материалов можно по формуле, предложенной в [12]:

$$\chi = \mu \frac{e_{int} - e_{ext}}{\theta_{int} - \theta_{ext}}. \quad (16)$$

Потенциал влажности, °В, в любом сечении  $i$  многослойной конструкции можно найти, подставив в (9) значение  $\Delta\theta$  из выражения (14):

$$\theta_i = \theta_{int} - (t_{int} - t_{si}) \frac{R_0 \sum R_{9i}}{R_9 \sum R_i} \delta_i. \quad (17)$$

Таким образом, определив распределение температурного поля в конструкции по выражению (2) можно найти распределение потенциала влажности по формуле (17).

Связь между различными шкалами потенциала влажности (°В и кДж/кг) была установлена С.В. Корниенко [10] на основе экспериментальных исследований. Пересчет поля потенциала влажности  $\theta$ , °В, определенного по формуле (17), в абсолютный потенциал влажности  $\theta_p$ , кДж/кг, производится по данным [10, табл. 2.5].

Сверхсорбционное увлажнение материалов ограждающих конструкций возникает при выполнении условия:

$$\theta_p > \theta_p^{m.s}, \quad (18)$$

где  $\theta_p^{m.s}$  – максимальный сорбционный потенциал влажности материала, кДж/кг, для его определения в [2, 10] предложена формула:

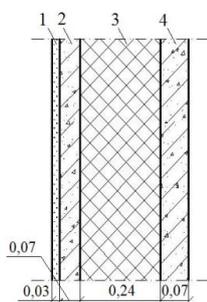
$$\theta_p^{m.s} = \frac{5314}{1 + 107,08 \exp(-0,106 t_8)} \cdot \quad (19)$$

Поглощение влаги материалом определяется зависимостью равновесного влагосодержания  $w$ , кг/кг от абсолютного потенциала влажности при разных температурах и характеризуется влагоемкостью материала  $c_{\theta p}(\theta_p, t)$ . В [10] предложен обобщающий показатель состояния влаги в материале конструкции – относительный потенциал влажности, показывающий степень насыщения материала влагой при изотермически обратимом процессе:

$$\theta_\varphi = \theta_p / \theta_p^{m.s} \cdot \quad (20)$$

Используя зависимости равновесного влагосодержания материала  $w$  от относительного потенциала влажности  $\theta_\varphi$  [10, табл. 2.8] определялось количество влаги, накапливаемой в материале конструкции, как капиллярно-связанной, так и свободной.

**Обсуждение результатов.** Расчет влагонакоплений в наружных стенах проводился в ПК Heating Point [17] для железобетонной конструкции наружной стены, показанной на рис. 1, для условий г. Новосибирска (расчетная температура наружного воздуха  $-37^\circ\text{C}$ ; средняя температура наиболее холодного месяца  $-17,3^\circ\text{C}$ ).

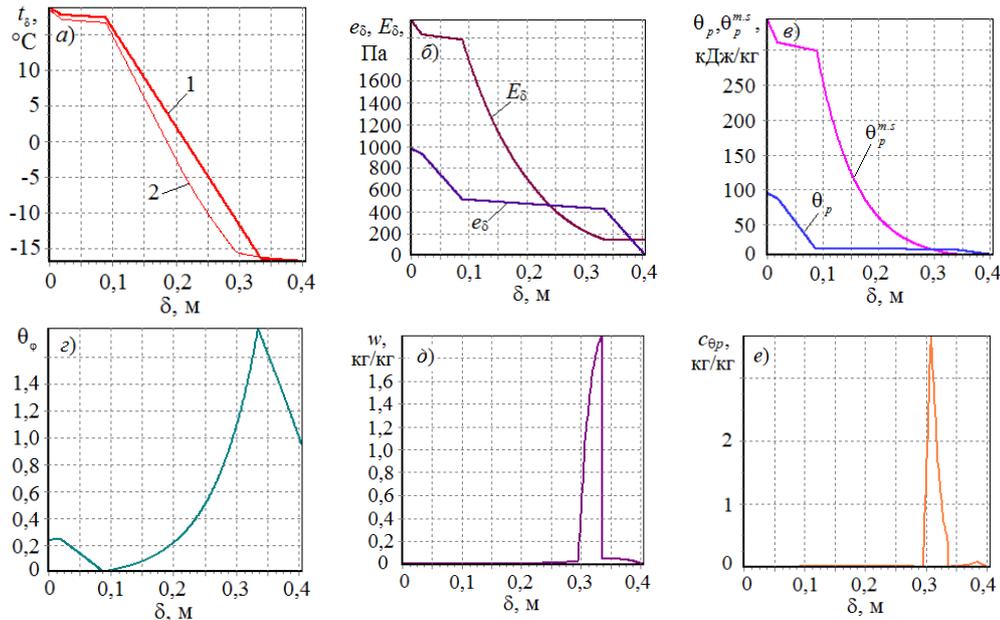


- 1 – гипсовый обшивочный лист (gypsum sheathing sheet)  $\rho=800 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda=0,15 \text{ Вт(м}\cdot\text{К)}$ ;
- 2, 4 – железобетон (reinforced concrete)  $\rho=2500 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda=1,69 \text{ Вт(м}\cdot\text{К)}$ ;
- 3 – плиты минераловатные (mineral wool slabs)  $\rho=200 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda=0,064 \text{ Вт(м}\cdot\text{К)}$

**Рис.1. Конструкция наружной стены**  
**Fig. 1. External wall structure**

Результаты расчета приведены на рис. 2. Наличие свободной влаги снижает термическое сопротивление стены. Количество свободной влаги в сечении стены показано на рис. 2д. Влага, в основном, накапливается в утеплителе. Однако, присутствие даже очень незначительного количества влаги в конструкционном материале (бетон) будет влиять на распределение температуры по толщине конструкции.

Как показано на рис. 2а, при наличии свободной влаги в стене, температура слоев стены будет ниже (линия 2), чем без учета влагонакоплений (линия 1).

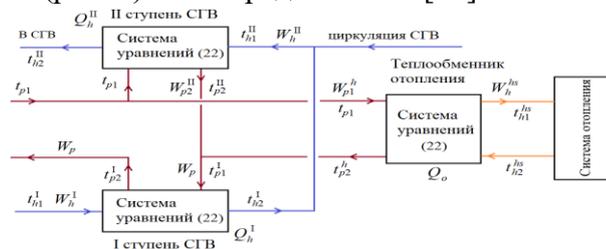


**Рис. 2. Результаты расчета влагонакоплений**  
**Fig. 2. Results of calculating moisture accumulation**

Теплопроводность слоя в сечении  $i$  ограждения определялась с учетом теплопроводности материалов  $\lambda_{\delta i}$  и свободной воды  $\lambda_{wi}$  при температуре  $t_{\delta}$ :

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{\delta i} + \lambda_{wi} W_i}{1 + W_i} \quad (21)$$

**Влияние влагонакоплений в стенах на внутреннюю температуру помещений.** Влагонакопления в наружных ограждениях будут влиять на изменение температуры внутреннего воздуха помещений, что особенно важно учитывать при аварийном режиме работы системы теплоснабжения. Методика численного моделирования режимов работы тепловых пунктов со связанной подачей теплоты (рис. 3) была предложена в [18].



**Рис. 3. Схема расчета теплового пункта со связанной подачей теплоты**  
**Fig. 3. Scheme for calculating a heat point with associated heat supply**

На рис. 3. тепловая мощность:  $Q_h^I$ ,  $Q_h^{II}$ ,  $Q_o$  – подогревателей первой и второй ступени горячего водоснабжения и отопления, соответственно, Вт; температуры воды:  $t_{h1}^I$ ,  $t_{h2}^I$  и  $t_{h1}^{II}$ ,  $t_{h2}^{II}$  – нагреваемой на входе и выходе подогревателей горячего водоснабжения первой и второй ступени;  $t_{p1}^I$ ,  $t_{p2}^I$  и  $t_{p1}^{II}$ ,  $t_{p2}^{II}$  – теплосетевой на входе и выходе подогревателей горячего водоснабжения первой и второй ступени;  $t_{p1}^h$ ,  $t_{p2}^h$  – на входе и выходе подогревателя отопления;  $t_{h1}^{hs}$ ,  $t_{h2}^{hs}$  – в подающей и обратной магистрали отопительной сети, °С;  $W = cG$  – эквивалент расхода ( $c$  – теплоемкость,  $G$  – расход воды):  $W_h^I$ ,  $W_h^{II}$  – нагреваемой воды в первой и второй ступени подогревателей горячего водоснабжения;  $W_p$ ,  $W_p^{II}$  – сетевой воды в первой и второй ступени подогревателей горячего водоснабжения;  $W_{p1}^h$  – сетевой воды в подогревателе отопления;  $W_h^{hs}$  – в системе отопления, Вт/К; СГВ – система горячего водоснабжения.

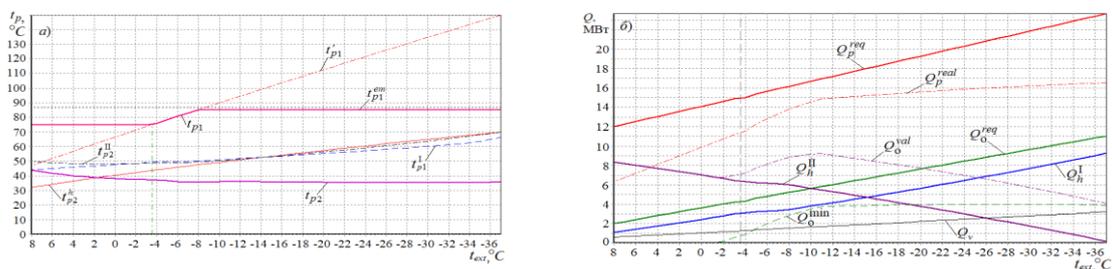
Для каждого из трех связанных теплообменников (рис. 3) решается система уравнений (22):

$$\left. \begin{aligned}
 Q &= \varepsilon W_{\min} D_t ; \\
 \varepsilon &= \frac{1 - \exp \left[ \frac{-kF}{W_{\min}} \cdot \left( 1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \right) \right]}{1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \cdot \exp \left[ \frac{-kF}{W_{\min}} \cdot \left( 1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \right) \right]} ; \\
 W_p &= \begin{cases} \frac{Q}{\varepsilon D_t} & \text{если } W_h > W_p ; \\ \left[ \frac{kF}{\Phi} \right]^2 \frac{1}{W_{\min}} = \left[ \frac{kF}{\Phi} \right]^2 \frac{\varepsilon D_t}{Q}, & \text{если } W_h < W_p ; \end{cases} \\
 t_{h2} &= t_{h1} + Q/W_h ; \\
 t_{p2} &= t_{p1} - Q/W_p ; \\
 \Delta t &= (\delta t_{\max} - \delta t_{\min}) (\ln \delta t_{\max} - \ln \delta t_{\min})^{-1} ; \\
 \delta t_{\max} &= \begin{cases} t_{p2} - t_{h1}, & \text{если } W_h < W_p ; \\ t_{p1} - t_{h2}, & \text{если } W_h > W_p ; \end{cases} \\
 \delta t_{\min} &= \begin{cases} t_{p1} - t_{h2}, & \text{если } W_h < W_p ; \\ t_{p2} - t_{h1}, & \text{если } W_h > W_p ; \end{cases} \\
 kF &= Q/\Delta t ; \\
 \Phi &= kF/\sqrt{W_p W_h} ; \\
 D_t &= t_{p1} - t_{h1}, \end{aligned} \right\} (22)$$

где для каждого теплообменника:  $Q$  – тепловая мощность, Вт;  $\varepsilon$  – эффективность;  $D_t$  – максимальная разность температур сетевой и нагреваемой воды;  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь, м<sup>2</sup>;  $\Phi$  – параметр.

Аналитический способ расчета, основанный на методике [18] приведен в [19].

При аварии на тепловых сетях или источнике теплоты применяется аварийный температурный график регулирования со сниженными параметрами сетевой воды. Так, в Новосибирске температура воды в аварийном режиме работы  $t_{p1}^{em} = 85^\circ\text{C}$  при расчетной температуре воды  $t_{p1}' = 150^\circ\text{C}$  (рис. 4а) [20]. Расчет выполнялся в ПК HeatingPoint [17] для зданий, присоединенных к центральному тепловому пункту (ЦТП-п27) в Первомайском районе г. Новосибирска с расчетной тепловой мощностью на отопление  $Q_{o\max} = 11,042$  МВт; на вентиляцию  $Q_{v\max} = 3,200$  МВт; на горячее водоснабжение  $Q_h = 9,542$  МВт. На рис. 4 показаны результаты расчета режимов работы теплового пункта в аварийном режиме.



**Рис. 4. Режимы работы ЦТП при аварийном графике отпуска теплоты**  
**Fig. 4. Modes of operation of the Central HS in case of an emergency schedule of heat supply**

Снижение температуры сетевой воды снижает располагаемую тепловую мощность системы теплоснабжения  $Q_p^{real}$ , которая будет меньше требуемой тепловой мощности  $Q_p^{req}$  (рис. 4б). Соответственно, снизится тепловая мощность системы отопления, которая в аварийном режиме работы теплосети в условиях максимального водопотребления в СГВ будет  $Q_o^{min}$  и меньше требуемой  $Q_o^{req}$ . При отсутствии водопотребления в СГВ или в случае отключения второй ступени подогревателя горячего водоснабжения, располагаемая тепловая мощность систе-

мы отопления будет соответствовать линии  $Q_o^{val}$  на рис. 4б. Однако, даже в этом случае при низких наружных температурах (ниже  $-21^{\circ}\text{C}$ ), система отопления не сможет обеспечить температуру в помещениях даже  $+18^{\circ}\text{C}$ , поскольку  $Q_o^{val} < Q_o^{req}$ .

Основываясь на методике [18] в [20, 21] был предложен способ определения допустимой длительности работы системы теплоснабжения в аварийных условиях для тепловых пунктов с различным соотношением тепловых нагрузок  $\rho$  на горячее водоснабжение  $Q_h$  и отопление  $Q_{omax}$  для зданий с наружными стенами с различными коэффициентами тепловой аккумуляции  $\beta$  [21]. Коэффициенты тепловой аккумуляции определялись по формуле Ю.В. Кононовича [22], похожая методика применяется и за рубежом, например [23].

$$\beta = \frac{k_t \sum \delta_i c_i \rho_i F_i / 2}{3600 \sum k_j F_j + L(c\rho)_{inf}}, \quad (23)$$

где  $k_t = 0,92$  для угловых помещений и радиаторных систем отопления;  $\delta_i, \rho_i, c_i, F_i$  – толщина, м, плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , теплоёмкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , площадь,  $\text{м}^2$ ,  $i$ -го слоя материала;  $L, \rho_{inf}, c_{inf}$  – расход,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , теплоёмкость,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , инфильтрационного воздуха;  $k_j, F_j$  – коэффициент теплопередачи и площадь конструкции.

Для присоединенных к ЦТП 14-этажных зданий, с наружными стенами, показанными на рис. 1, коэффициент тепловой аккумуляции без учета влагонакоплений в стенах составил  $\beta = 41,55$  ч. С учетом снижения термического сопротивления вследствие увлажнения материалов конструкций коэффициент тепловой аккумуляции  $\beta_w = 38,95$  ч. Температура наружного воздуха  $t_{ext}$  принята по [24] в течение 6-10 декабря 2018 г, рис. 5.

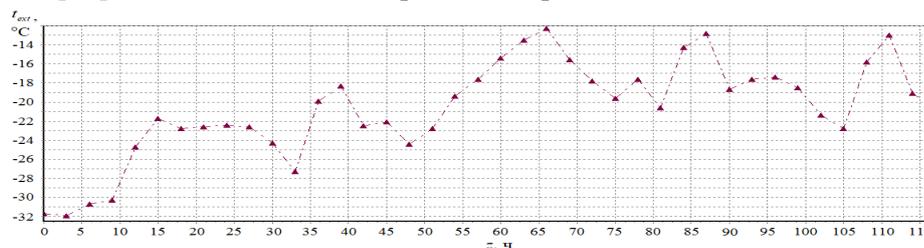


Рис. 5. Температура наружного воздуха 6-10 декабря 2018 г.  
 Fig. 5. Outside air temperature December 6-10, 2018

Эксплуатационные температура сетевой воды в подающей  $t_{p1}^{exp}$  и в обратной  $t_{p2}^{exp}$  магистрали и расход воды в теплосети  $G$  в этот период времени показаны на рис. 6.

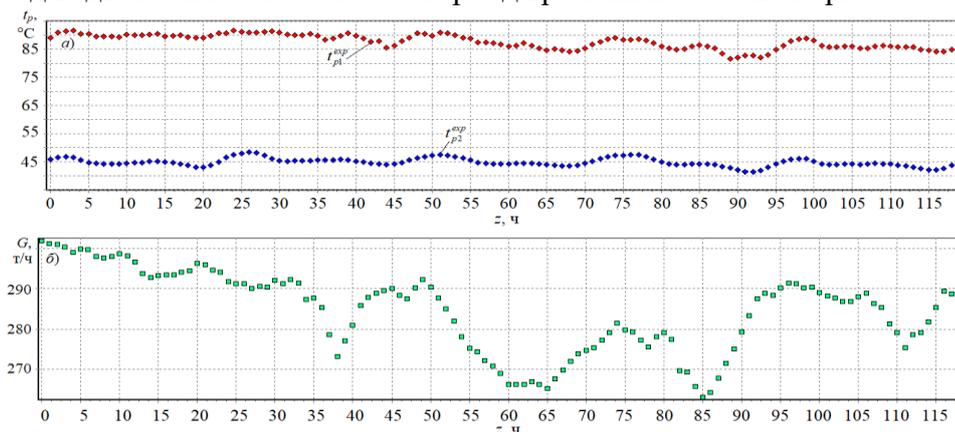


Рис. 6. Температура (а) и расход воды в теплосети (б) 6-10 декабря 2018 г.  
 Fig. 6. Temperature (a) and water flow rate in the heating network (b) December 6-10, 2018

Температура внутреннего воздуха  $t_{int}$  (без учета влагонакоплений в стенах) в сравнении с  $t_{int}^w$  (с учетом свободной влаги) определялась по методике [20, 21] в аварийном режиме работы системы теплоснабжения (рис. 6) при текущей наружной температуре (рис. 5), и переменном

водопотреблении в СГВ, по формуле, предложенной Е.Я Соколовым [25]. Результаты расчета приведены на рис. 7.

$$t_{int}^{real}(z) = t_{ext} + \left[ \frac{Q_o}{Q_o^{req}} + \left( \frac{t_{int}^{cur} - t_{ext}}{t_{int}^{req} - t_{ext}} - \frac{Q_o}{Q_o^{req}} \right) e^{\frac{-z}{\beta}} \right] (t_{int}^{req} - t_{ext}), \quad (24)$$

где  $t_{int}^{cur}$  – текущая температура внутреннего воздуха за рассматриваемый период времени  $z$ , ч;  
 $t_{int}^{req} = 18^\circ\text{C}$  – температура внутреннего воздуха, на которую рассчитан температурный график регулирования.

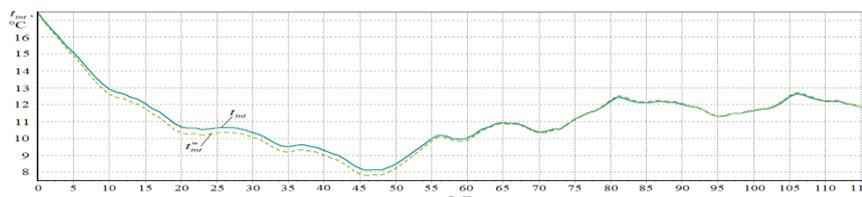


Рис. 7. Температура внутреннего воздуха помещений 6-10 декабря 2018 г.  
Fig. 7. Indoor air temperature on December 6-10, 2018

После снижения параметров теплоносителя при низкой наружной температуре (рис. 5), температура внутреннего воздуха постепенно понижается. В начальный момент времени наличие в конструкции влаги в свободном состоянии мало влияет на изменение температуры внутреннего воздуха, что связано с двумя противоположно направленными процессами: конденсацией влаги с выделением тепла и одновременным увеличением теплопроводности строительной конструкции.

Однако с течением времени большая часть влаги конденсируется, и увеличение теплопроводности увлажненного материала сказывается на снижении термического сопротивления стены, и, соответственно, на снижении температуры внутреннего воздуха. Далее, с повышением температуры наружного воздуха, температура внутреннего воздуха несколько повышается и стабилизируется приблизительно на уровне, соответствующем точке росы внутреннего воздуха (рис. 7).

**Вывод.** Разработана комплексная методика, позволяющая определить влияние свободной влаги, накапливаемой в строительных конструкциях на температуру внутреннего воздуха помещений в аварийных условиях работы теплосети.

Наличие влагонакоплений не только влияет на теплотехнические характеристики наружных ограждений, но также снижает их теплоаккумулирующую способность, которая является важным свойством конструкций при связанной подаче теплоты. Поведение свободной влаги в строительной конструкции необходимо учитывать при определении допустимого времени остывания помещений при аварии в тепловых сетях.

#### Библиографический список:

1. Самарин О.Д. О расчёте охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия вузов. Строительство, 2007. № 2. С. 46-50.
2. Корниенко С.В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций // Вестник МГСУ, 2016. № 11. С. 132-142.
3. D'Agostino D. Moisture dynamics in an historical masonry structures: the Cathedral of Lecce (South Italy) // Building and Environment, 2013. Vol. 63. pp. 122-133.
4. Woroniak G., Piotrowska-Woroniak J. Effects of pollution reduction and energy consumption reduction in small churches in Drohiczyn community // Energy and Buildings, 2014. Vol. 72. Pp. 51-61.
5. Sadiq H., Wong M.B., Zhao X.L., Al-Mahaidi R. Heat transfer model for a cementitious-based insulation with moisture // Fire and materials, 2014. Vol. 38. Iss. 5. pp. 550-558.
6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Авок-пресс, 2006. 256 с.
7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Москва: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
8. В.Г. Гагарин, К.П. Зубарев. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ, 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 484-493.
9. Кучеренко М.Н, Чиркова Е.В. Применение теории потенциала влажности для расчёта переноса влаги через наружные ограждения // Известия вузов. Строительство, 2013. № 5. С. 63-67.

10. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Волгоград, 2018. 380 с.
11. Перехоженцев А.Г. Расчет распределения влаги в многослойных ограждающих конструкциях на основе потенциала влажности при неизотермическом квазистационарном режиме // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура, 2006. Вып. 6(21). С. 10-13.
12. Кучеренко М.Н., Чиркова Е.В. Термодинамическое обоснование определения коэффициента влагонепроводности строительных материалов // Приволжский научный журнал, 2010. № 4. С. 129-135.
13. Богословский В.Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий. Москва: МГСУ, 2013. 112 с.
14. Бодров В.И. Регулирование интенсивности потоков влаги в наружных ограждениях // Приволжский научный журнал, 2012. № 4. С. 85-89.
15. Корниенко С.В. Инженерная оценка влажности наружных стен // Вестник ВолгГАСУ, 2015. Вып. 1(37). С. 1-13.
16. Корниенко С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом // ACADEMIA. Архитектура и строительство, 2009. №5. С. 389-394.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666554. HeatingPoint / автор Рафальская Т.А. (RU); правообладатель: Рафальская Т.А. (RU) за-явл. 03.11.2020; опублик. 11.12.2020.
18. Rafalskaya T.A. Investigating the Possibility of Using Low-Temperature Heat Supply with the Central Qualitative Regulation // Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, No 11, pp. 858-867.
19. Рафальская Т. А. Уравнения температурных графиков режимов работы теплового пункта с двухступенчатой схемой присоединения подогревателей горячего водоснабжения // Научный журнал строительства и архитектуры, 2020. № 2 (58). С. 29-41.
20. Рафальская Т.А. Энергетическая безопасность теплоснабжения при аварийном режиме отпуска теплоты от ТЭЦ // Промышленная энергетика, 2016. №11. С. 23-27.
21. Рафальская Т.А., Мансуров Р.Ш., Березка А.К., Савенков А.А. Исследование теплозащиты наружных ограждений зданий при аварийном теплоснабжении // Вестник Сам-ГТУ. Технические науки, 2017. №3 (55). С. 98-109.
22. Кононович Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки. Москва: Стройиздат, 1986. 157 с.
23. Hongwei Li, Stephen Jia Wang. Load Management in District Heating Operation // Energy Procedia 75 (2015) 1205-1207. Doi:10.1016/j.egypro.2015.07.155.
24. Погода и климат в Новосибирске. Погода и климат [Электронный ресурс]. Режим доступа. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения 10.02.2021).
25. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Издательство МЭИ, 2001. 472 с.

#### References:

1. Samarin O.D. O raschote okhlazhdeniya naruzhnykh sten v avariynykh rezhimakh teplo-snbzheniya // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [Samarin O.D. On the calculation of the cooling of external walls in emergency modes of heat supply // Izvestiya vuzov. Construction, 2007. No. 2. pp. 46-50. (In Russ)]
2. Korniyenko S.V. Utochneniye raschetnykh parametrov mikroklimate pomeshcheniy pri otsenke vlagozashchitnykh svoystv ograzhdayushchikh konstruksiy [Korniyenko S.V. Refinement of the calculated parameters of the microclimate of the premises when assessing the moisture-protective properties of the enclosing structures. Vestnik MGSU, 2016. No. 11. pp. 132-142. (In Russ)]
3. D'Agostino D. Moisture dynamics in an historical masonry structures: the Cathedral of Lecce (South Italy) // Building and Environment, 2013. Vol. 63. pp. 122-133.
4. Woroniak G., Piotrowska-Woroniak J. Effects of pollution reduction and energy consumption reduction in small churches in Drohiczyn community // Energy and Buildings, 2014. Vol. 72. pp. 51-61.
5. Sadiq H., Wong M.B., Zhao X.L., Al-Mahaidi R. Heat transfer model for a cementitious-based insulation with moisture // Fire and materials, 2014. Vol. 38. Iss. 5. pp. 550-558.
6. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy. Moskva: AVOK-PRESS. [Fokin K.F. Building heat engineering of building envelopes. Moscow: AVOK-PRESS, 2006.256 p. (In Russ)]
7. Bogoslovskiy V.N. Stroitel'naya teplofizika. [Bogoslovskiy V.N. Building thermal physics. Moscow: AVOK North-West, 2006.400 p. (In Russ)]
8. V.G. Gagarin, K.P. Zubarev. Primeneniye teorii potentsiala vlazhnosti k modelirovaniyu nestatsionarnogo vlazhnostnogo rezhima ograzhdeniy. [V.G. Gagarin, K.P. Zubarev. Application of the theory of moisture potential to modeling the non-stationary moisture regime of fences // Vestnik MGSU, 2019. V. 14. Issue. 4.S. 484-493. (In Russ)]
9. Kucherenko M.N, Chirkova Ye.V. Primeneniye teorii potentsiala vlazhnosti dlya raschota perenosa vlagi cherez naruzhnyye ograzhdeniya. [Kucherenko M.N., Chirkova E.V. Application of the theory of moisture potential for calculating moisture transfer through external enclosures // Izvestiya vuzov. Construction, 2013. No. 5. S. 63-67.
10. Korniyenko S.V. Povysheniye energoeffektivnosti zdaniy za schet sovershenstvovaniya metodov rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksiy. [Korniyenko S.V. Improving the energy efficiency

of buildings by improving methods for calculating the temperature and humidity conditions of enclosing structures // Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Volgograd, 2018.380 p. (In Russ)]

11. Perekhozhentsev A.G. Raschet raspredeleniya vlagi v mnogosloynnykh ograzhdayushchikh konst-ruktsiyakh na osnove potentsiala vlazhnosti pri neizotermicheskom kvazistatsionarnom rezhime [Perehozhentsev A.G. Calculation of moisture distribution in multilayer enclosing structures based on the moisture potential in non-isothermal quasi-stationary mode // Vestnik VolgGASU. Series: Building and architecture, 2006. Vol. 6 (21). pp. 10-13. (In Russ)]

12. Kucherenko M.N., Chirkova Ye.V. Termodinamicheskoye obosnovaniye opredeleniya koeffi-tsiyenta vlagoprovodnosti stroitel'nykh materialov. [Kucherenko M.N., Chirkova E.V. Thermodynamic substantiation of determining the coefficient of moisture conductivity of building materials // Privolzhsky scientific journal, 2010. No. 4. pp. 129-135. (In Russ)]

13. Bogoslovskiy V.N. Osnovy teorii potentsiala vlazhnosti materiala primenitel'no k naruzhnym ograzhdeniyam obolochki zdaniy. [Bogoslovsky V.N. Fundamentals of the theory of material moisture potential as applied to the outer fences of the building envelope. Moscow: MGSU, 2013.112 p. (In Russ)]

14. Bodrov V.I. Regulirovaniye intensivnosti potokov vlagi v naruzhnykh ograzhdeniyakh [Bodrov V.I. Regulation of the intensity of moisture flows in external enclosures // Privolzhsky scientific journal, 2012. No. 4. pp. 85-89. (In Russ)]

15. Korniyenko S.V. Inzhenernaya otsenka vlazhnosti naruzhnykh sten.[Korniyenko S.V. Engineering assessment of the moisture content of external walls//Bulletin of VolgGASU, 2015. Issue. 1(37). pp.1-13. (In Russ)]

16. Korniyenko S.V. Temperaturno-vlazhnostnyy rezhim naruzhnykh sten s ventiliruyemym fasadom // ACADEMIA. [Korniyenko S.V. Temperature and humidity conditions of external walls with a ventilated facade // ACADEMIA. Architecture and construction, 2009. No. 5. pp. 389-394. (In Russ)]

17. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2020666554. [Certificate of state registration of a computer program No. 2020666554. HeatingPoint / author Rafalskaya T.A. (RU); copyright holder: Rafalskaya T.A. (RU) app. 03.11.2020; publ. 11.12.2020. (In Russ)]

18. Rafalskaya T.A. Investigating the Possibility of Using Low-Temperature Heat Supply with the Central Qualitative Regulation // Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, no.11, pp. 858-867.

19. Rafal'skaya T. A. Uravneniya temperaturnykh grafikov rezhimov raboty teplovogo punkta s dvukhstupenchatoy skhemoy prisoyedineniya podogrevateley goryachego vodosnab-zheniya. [Rafalskaya T. A. Equations of temperature graphs of operating modes of a heating station with a two-stage connection scheme for hot water heaters // Scientific journal of construction and architecture, 2020. No. 2 (58). pp. 29-41. (In Russ)]

20. Rafal'skaya T.A. Energeticheskaya bezopasnost' teplosnabzheniya pri avariynom rezhime otpuska teploty ot TETS . [Rafalskaya T.A. Energy security of heat supply in emergency mode of heat supply from CHPP // Industrial energy, 2016. No. 11. pp. 23-27. (In Russ)]

21. Rafal'skaya T.A., Mansurov R.SH., Berezka A.K., Savenkov A.A. Issledovaniye teploza-shchity naruzhnykh ograzhdeniy zdaniy pri avariynom teplosnabzhenii. [Rafalskaya T.A., Mansurov R.Sh., Berezka A.K., Savenkov A.A. Investigation of heat protection shields of external enclosures of buildings during emergency heat supply. Vestnik Sam-GTU. Technical sciences, 2017. No. 3 (55). pp. 98-109. (In Russ)]

22. Kononovich YU.V. Teplovoy rezhim zdaniy massovoy zastroyki. [Kononovich Yu.V. Thermal regime of buildings of mass development. Moscow: Stroyizdat, 1986.157 p. (In Russ)]

23 Hongwei Li, Stephen Jia Wang. Load Management in District Heating Operation // Energy Procedia 75 (2015) 1205-1207. Doi: 10.1016 / j.egypro.2015.07.155.

24. Pogoda i klimat v Novosibirske. Pogoda i klimat [Weather and climate in Novosibirsk. Weather and climate [El. resource]. Access mode. - URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (date of access 10.02.2021). (In Russ)]

25. Sokolov Ye.YA. Teplofikatsiya i teplovyye seti. [Sokolov E.Ya. Heating and heating networks. Moscow: MEI Publishing House, 2001.472 p. (In Russ)]

**Сведения об авторе:**

Рафальская Татьяна Анатольевна, кандидат технических наук, доцент; [rafalskaya.ta@yandex.ru](mailto:rafalskaya.ta@yandex.ru)  
ORCID 0000-0002-6304-8680

**Information about the author:**

Tatiana A. Rafalskaya, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof; [rafalskaya.ta@yandex.ru](mailto:rafalskaya.ta@yandex.ru)

**Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 28.04.2021.

**Принята в печать** 31.05.2021.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

**Received** 28.04.2021.

**Accepted for publication** 31.05.2021.