

УДК 621.17

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142530

© Лухтура Ф.І.<sup>1</sup>, Плахотник К.Є.<sup>2</sup>, Цыганов В.И.<sup>3</sup>**ОБ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Рассмотрены вопросы, связанные с влиянием импульсного нагрева теплоносителя на эффективность работы и параметры систем теплоснабжения. На основе анализа уравнения динамики нагрева теплоносителя определены рациональные значения длительности подвода тепла и паузы между импульсами, а также скважности импульсов, в зависимости от величин поверхности нагрева отопительных приборов в зданиях и тепловых потерь в окружающую среду. Показано существенное влияние указанных функциональных параметров на характеристики импульсного подвода тепла и интенсивность нагрева теплоносителя. Определены диапазоны изменения частоты импульсов, в пределах которых может быть эффективен импульсный режим подвода тепла в системах отопления.

**Ключевые слова:** источник тепла, теплоноситель, система теплоснабжения, импульс, коэффициент заполнения цикла.

**Лухтура Ф.І., Плахотник К.Є., Цыганов В.И. Про імпульсний нагрів теплоносія у системах теплопостачання.** Розглянуто питання, пов'язані з впливом імпульсного нагріву теплоносія на ефективність роботи і параметри систем теплопостачання. При реалізації такого методу в системах опалення приватних житлових приміщень (будинків) «водогрійний котел – теплообмінники – житлові приміщення», де робочим тілом (теплоносієм) є вода та ін., необхідно, поряд з підтриманням комфортних умов всередині приміщень, створити ефективний режим експлуатації з мінімізацією споживання палива, що можливо може бути взаємовиключними факторами впливу. Крім того, в технічній літературі теоретичне обґрунтування ефективності використання імпульсного нагріву теплоносія в системах опалення житлових будинків вкрай обмежена, що послужило формулюванню мети даної роботи. Для її досягнення розроблена математична модель теплової роботи індивідуальної системи опалення будівлі з імпульсним нагріванням теплоносія. На основі аналізу рівняння динаміки нагріву теплоносія визначені основні параметри імпульсного опалення системи теплопостачання будівлі, раціональні значення тривалості підведення тепла і паузи між імпульсами, а також скважності імпульсів, в залежності від величин поверхні нагріву опалювальних приладів в будинках і теплових втрат в навколишнє середовище. Показано суттєвий вплив зазначених функціональних параметрів на характеристики імпульсного підведення тепла і інтенсивність нагріву теплоносія. Визначено діапазони зміни частоти імпульсів, в межах яких може бути більш ефективний імпульсний режим підведення тепла в системах опалення. Введено поняття, за аналогією з регулярним режимом нагріву (охолодження), темпу нагріву (охолодження) теплоносія – швидкості зміни його температури.

**Ключові слова:** джерело тепла, теплоносії, система теплопостачання, імпульс, коефіцієнт заповнення циклу.

**F.I. Lukhtura, K.Ye. Plakhotnik, V.I. Tsiganov. On pulsing heating of the heat transfer medium in thermal delivery systems.** The questions connected with the influence of pulsed heating of the coolant on the operating efficiency and the parameters of the heat supply systems are considered. When implementing such a method in the heating systems

<sup>1</sup> ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [luhturaelena@gmail.com](mailto:luhturaelena@gmail.com)

<sup>2</sup> студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*of private residential buildings (houses) «hot water boiler – heat exchangers – living quarters», where the working body (heat carrier) is water, it is necessary, along with maintaining comfortable conditions inside the premises, to create an efficient operating mode with minimizing fuel consumption, which may possibly be mutually exclusive influencing factors. In addition, the theoretical justification of the efficiency of using pulsed heating of heating medium in heating systems of residential buildings is extremely limited in the technical literature, which served to formulate the purpose of this work. To achieve it, a mathematical model of the thermal performance of the individual heating system of the building with pulsed heating of the coolant has been developed. Based on the analysis of the heat carrier heating dynamics equation, the main parameters of impulse heating of a heat supply system of a building are determined, the rational values for the duration of the heat input and the pause between the pulses, and the duty cycle of the pulses, depending on the heating surface of the heating devices in the buildings and the thermal losses to the environment. The essential influence of these functional parameters on the characteristics of the impulse heat supply and the heat carrier heating intensity has been shown. The ranges of the change in the pulse frequency have been determined, within which the pulse mode of heat supply in heating systems can be more effective. The concept has been introduced, by analogy with the regular mode of heating (cooling), the rate of heating (cooling) of the coolant – the rate of change in its temperature.*

**Keywords:** heat source, heat carrier, heat supply system, impulse, duty cycle.

**Постановка проблеми.** В настоящее время теплоэнергетика вступает в новый этап своего развития, связанный с повышением тепловой эффективности теплоснабжения жилых и общественных зданий. Повышение тепловой эффективности происходит с учетом предыдущих достижений по энергосбережению, с использованием новейших инновационных энергосберегающих решений в системах теплоснабжения зданий. Снижение затрат энергии на обеспечение микроклимата в зданиях и сооружениях является весьма актуальной проблемой. Её решение может быть выполнено лишь на основе всестороннего анализа теплового процесса, реализуемого в здании, под которым понимается последовательная цепь взаимообусловленных энергетических превращений, связанных с переносом теплоты от источника в окружающую среду. Возможности дальнейшего совершенствования работы теплоэнергетических установок (в первую очередь, источников тепла – водогрейных котлов), базирующихся на хорошо изученном стационарном процессе горения, ограничены. Поэтому необходимо осваивать новые энергосберегающие технологии. В этом направлении весьма перспективным представляется реализация в теплоэнергетических установках процессов пульсирующего подвода тепла и (или) пульсирующего горения. Не случайно во многих странах ведутся интенсивные исследования в области проектирования и внедрения в технологические процессы теплоэнергетических установок на основе систем пульсирующего горения или пульсирующего подвода тепла. Широкое внедрение таких систем в технологические процессы сдерживается отсутствием надежной теории их рабочего процесса для расчета конструктивных и режимных параметров при их проектировании.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Работы по теоретическому обоснованию и технической реализации технологии импульсного горения (отопления) начаты практически в начале прошлого века и продолжились в 60-70-е годы прошлого столетия. В эти же годы начали активно и широко разрабатываться системы импульсного горения, импульсного нагрева заготовок, отопления [1-5] и которые, в основном, применялись в энергетических котлах и в нагревательных печах камерного типа, в первую очередь, нагревательных колодцах для нагрева слитков металла [4-6]. Позже импульсное отопление получило своё развитие в термических печах [5-6]; также были рассмотрены режимы импульсно-скоростного нагрева [7-8]. В то же время тепловая работа методических печей с импульсным отоплением и нагрев в них металла освещены мало [9]; некоторые специфические особенности, по мнению [9], не раскрыты и требуют дальнейшего изучения.

Суть импульсного отопления заключается в том, что при управлении тепловой мощностью печи расход газа изменяется дискретно и может принимать только два предельных значения: максимальное, соответствующее наиболее благоприятному распределению газов в рабочей

камере, и минимально-допустимое по условию работы горелочных устройств и обеспечению рабочего давления в печи. Подвод тепла регулируется модуляцией частоты цикла. Цикличность подвода тепла осуществляется следующим образом: в течение контролируемого промежутка времени горелки работают в режиме «большого» горения, а затем переключаются в режим «малого» горения или полностью выключаются. Этот цикл повторяется довольно часто и промежуток времени включения и отключения управляется. Поэтому импульсное горение может быть названо частотно-модулированным горением. При реализации предлагаемого метода нагрев очередной порции теплоносителя осуществляется в условиях наибольшей разности температур, что позволяет заметно интенсифицировать процесс теплообмена за счет увеличения конвективной составляющей и радиационной (излучательной) поверхности факела горения.

При изменении температуры в печи изменяется длительность импульсов подачи топлива [5-9], таким образом, осуществляется широтно-импульсная модуляция газо-воздушного потока. Средняя по времени тепловая нагрузка определяется соотношением длительности импульса и паузы – скважностью, что устанавливает регулятор температуры в печи.

Импульсный подвод тепла, наряду с вышеприведенным применением, может использоваться также и при теплоснабжении зданий, и в системах отопления с тепловыми насосными установками [10]. При реализации такого метода в системах отопления частных жилых помещений (домов) «водогрейный котел–теплообменники–жилые помещения», где рабочим телом (теплоносителем) является обычно вода, необходимо, наряду с поддержанием комфортных условий внутри помещений, создать эффективный режим эксплуатации с минимизацией потребления топлива, что возможно может быть взаимно исключаящими факторами влияния.

Целесообразность такого направления работы в системах теплоснабжения зданий [10-16] обусловлена тем, что импульсный режим отопления промышленных печей, как это установлено [5-9], характеризуется заметной экономией тепловой энергии. Поэтому вполне оправданным является и ожидание того, что применение такого режима для отопления зданий будет также энергетически выгодным.

Одна из главных функций любой системы отопления (при нагреве металла слитков в нагревательных печах [4-9], теплоносителя в системах теплоснабжения жилых зданий [10, 13-16], импульсного горения [1-3, 11, 12] и др.) – управление горением – это регулирование подвода тепла в соответствии с потребностями процесса. При использовании импульсного нагрева теплоносителя в системах отопления жилых зданий теоретическое обоснование его эффективности и глубокий анализ динамики импульсного отопления в технической литературе, кроме [10] и попытки в [13-16], практически отсутствуют.

**Цель работы** – разработка физической модели рабочего процесса с импульсным подводом тепла к системе отопления зданий и его анализ, обоснование эффективности и преимущества использования импульсного подвода тепла к системе отопления для повышения эффективности теплоснабжения зданий.

**Изложение основного материала.** Пусть имеем систему отопления объемом  $V$  с источником тепловой энергии (котлом), с массой теплоносителя  $m$ , и площадью поверхности теплообмена  $F_{нагр}$  (систему отопления конкретного здания объемом помещений  $W$  или поверхностью ограждений  $F$  можно условно заменить эквивалентным отопительным прибором).

Примем, что температура окружающей среды и коэффициенты теплопередачи постоянны. Обозначим среднюю температуру теплоносителя  $\vartheta$ , среднюю температуру воздуха в помещении –  $\theta$ . Справедливость предположения о преимуществе использования импульсного нагрева теплоносителя в системах отопления можно доказать лишь на основе анализа уравнения динамики импульсного нагрева теплоносителя (1) и его остывания (охлаждения) (2) (в отсутствие его нагрева при отключении подачи топлива в горелочное устройство котла):

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3; \quad (1)$$

$$dQ_2 = -dQ_3; \quad (2)$$

$$dQ_1 = Pdt; \quad dQ_2 = mcd\vartheta; \quad dQ_3 = kF(\theta - \vartheta_0)dt = kF(\kappa\vartheta - \kappa\vartheta_0)dt,$$

где  $dQ_1$  – подводимая теплота;

$dQ_2$  – теплота, затраченная на изменение температуры теплоносителя;

$dQ_3$  – потери теплоты в помещение (и окружающую среду).

$P$  – подводимая тепловая мощность;

$dt$  – інтервал времени;  
 $m$  – масса нагреваемого теплоносителя;  
 $c$  – теплоемкость теплоносителя;  
 $\vartheta$  – текущая температура теплоносителя;  
 $k$  – коэффициент теплопередачи;  
 $F$  – поверхность теплопередачи (поверхность ограждения);  
 $\theta$  – температура воздуха в помещении, для простоты принята пропорциональной температуре теплоносителя;  
 $\vartheta_0$  – температура окружающей среды (в помещении или за ее пределами);  
 $\kappa$  – коэффициент пропорциональности температуры воздуха внутри помещения температуре теплоносителя.

Коэффициент  $\kappa$  зависит от параметров теплообмена между теплоносителем и окружающей средой. С достаточной точностью этот коэффициент можно определить из равенства тепловых потоков от теплоносителя в жилое помещение и от атмосферы внутреннего помещения в окружающую среду при квазистационарном режиме теплообмена

$$kF(\theta - \vartheta_0)dt = k_{нагр} F_{нагр} (\vartheta - \theta)dt = k_{нагр} F_{нагр} \kappa(\vartheta - \vartheta_0)dt ,$$

или

$$\theta = \frac{\vartheta}{1 + \kappa_0} + \frac{\kappa_0}{1 + \kappa_0} \vartheta_0, \quad \kappa_0 = \frac{kF}{k_{нагр} F_{нагр}},$$

$$\kappa = \frac{1}{1 + \kappa_0} = \frac{1}{1 + \frac{kF}{k_{нагр} F_{нагр}}} < 1.$$

где  $k_{нагр}$  – коэффициент теплопередачи от отопительных приборов в обогреваемое помещение;  $F_{нагр}$  – поверхность нагрева отопительных приборов.

Соотношения (1) и (2), с учетом обозначений в первом соотношении величины  $\frac{P}{\kappa \cdot kF} + \vartheta_0$  символом  $\vartheta_{уст}$ , во втором –  $\vartheta_0$  символом  $\vartheta_{уст}$ , сводятся к общему виду

$$\frac{T}{\kappa} \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta - \vartheta_{уст} = 0 \tag{3}$$

или

$$\frac{d(\vartheta - \vartheta_{уст})}{(\vartheta - \vartheta_{уст})} = -\frac{\kappa}{T} \cdot dt, \text{ или } -\frac{1}{\vartheta'} \frac{d\vartheta'}{dt} = M, \tag{4}$$

$$\vartheta' = \vartheta - \vartheta_{уст}, \quad M = \frac{\kappa}{T}.$$

Здесь  $\frac{mc}{kF} = T$  – некоторая временная постоянная.

Символ  $\vartheta_{уст}$  обозначает установившееся значение температуры теплоносителя, достигаемое при прекращении изменения, т. е. при выполнении условия  $\frac{d\vartheta}{dt} = 0$  выхода на стационарный режим.

Запись уравнений (3) в виде (4) аналогична соотношению Г.М. Кондратьева для регулярного режима охлаждения (нагрева) тела [17, 18], а величину  $M$  скорости изменения  $\vartheta'$  по аналогии с теорией регулярного режима можно назвать темпом охлаждения (или нагрева). Значение  $M$  зависит от физических свойств теплоносителя, его размеров, условий теплообмена (поверхности теплообмена и коэффициента теплопередачи от обогревателей в помещение или через ограждение здания).

Выражения (3) и (4) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка, решением которого является

$$\vartheta = \vartheta_{нач} e^{-t\kappa/T} + \vartheta_{уст} (1 - e^{-t\kappa/T}) = \vartheta_{уст} - (\vartheta_{уст} - \vartheta_{нач}) \cdot e^{-t\kappa/T}, \tag{5}$$

где  $\vartheta_{нач}$  – начальная температура теплоносителя (температура в начале процесса нагрева

(остывания) при  $t = 0$ ).

Графическое изображение этого решения представлено на рисунке 1. Граничные значения температуры теплоносителя могут быть записаны в виде условий:  $\vartheta = \vartheta_{нач}$  при  $t = 0$  и  $\vartheta = \vartheta_{уст}$  при  $t \rightarrow \infty$ .

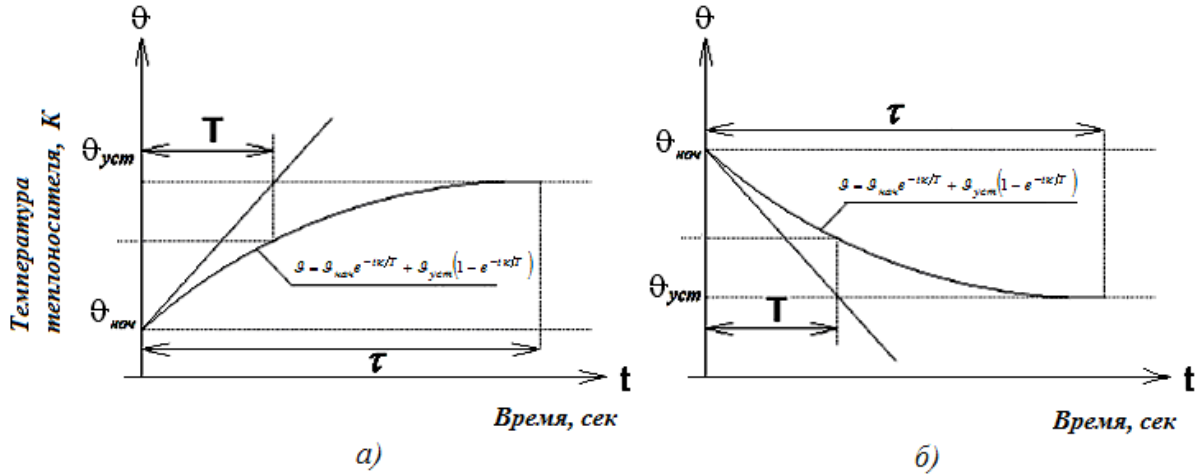


Рис. 1 – Графическое представление зависимости температуры теплоносителя от: а – времени нагрева; б – остывания

Таким образом, графически нагрев и остывание (охлаждение) теплоносителя в импульсном режиме проиллюстрированы на рисунке 1 (соответственно, а) и б)). Подводимая мощность в котле, нагрев теплоносителя за время  $\tau_{имп}$  и остывание теплоносителя во время паузы  $\tau_{паузы}$  в импульсном режиме проиллюстрированы на рисунке 2.

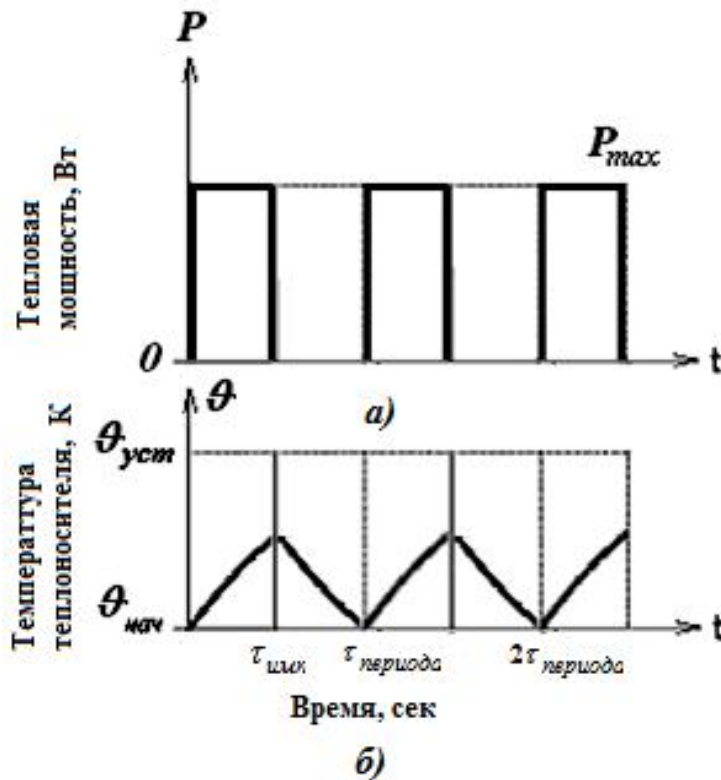


Рис. 2 – Динамика подвода тепловой мощности в котле к теплоносителю (а), нагрева и остывания теплоносителя (б) в импульсном режиме

При этом длительность нагрева (*импульс нагрева*) – отрезок времени, в течение которого горелка котла работает при максимальном расходе топлива. Этот отрезок времени можно определить, используя соотношение (5):

$$\tau_{имп} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta} \quad (6)$$

Длительность остывания (*пауза*) – отрезок времени между двумя последовательными импульсами, в течение которого топливо на горелку котла не подаётся, и происходит охлаждение теплоносителя вследствие потерь тепла в окружающую среду

$$\tau_{паузы} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\vartheta_{нач} - \vartheta_0}{\vartheta - \vartheta_0} \quad (7)$$

Тогда *период включения*  $\tau_{периода}$  – отрезок времени между началами двух последовательных импульсов, определяется суммой соотношений (6) и (7), а их *скважность*  $S$  равна отношению периода  $\tau_{периода}$  следования импульсов к длительности импульса  $\tau_{имп}$

$$S = \frac{\tau_{периода}}{\tau_{имп}} = 1 + \left( \ln \frac{\vartheta_{нач.паузы} - \vartheta_0}{\vartheta_{кон.паузы} - \vartheta_0} \right) / \left[ \ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач.имп}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{кон.имп}} \right] \quad (8)$$

При этом  $\vartheta_{кон.имп} = \vartheta_{нач.паузы}$ ,  $\vartheta_{нач.имп} = \vartheta_{нач.паузы}$ .

В общем случае сложных форм импульсов *скважность* определяется отношением площади осциллограммы, ограниченной по горизонтали длительностью периода  $\tau_{имп}$ , а по вертикали – амплитудой импульсов теплоподвода, к площади, занимаемой этими импульсами в указанных границах.

Тогда осредненные величины тепловой мощности  $P_{cp}$  определяются по формуле:

$$P_{cp} = \frac{P_A}{S} = P_A \cdot \beta \quad (9)$$

Коэффициент заполнения цикла или коэффициент использования мощности источника тепла (горелок)  $\beta$  – обратная величина *скважности* импульсов – отношение длительности импульса к периоду включения:

$$\beta = \frac{1}{S} = \frac{\tau_{имп}}{\tau_{периода}} = \frac{B}{B^{уст}} \quad (10)$$

где  $\tau_{периода}$  – период включения источника тепла, с;

$\tau_{имп}$  – продолжительность одного импульса, с;

$B$  – осредненный по времени расход топлива при импульсном нагреве теплоносителя, м<sup>3</sup>/с;

$B^{уст}$  – установленный (максимальный) расход топлива, м<sup>3</sup>/сек;

а продолжительность одного импульса

$$\tau_{имп} = \beta \cdot \tau_{периода} \quad (11)$$

Средний расход топлива в горелке котла  $B^{имп}$  при импульсном режиме рассчитывается как

$$B^{имп} = \frac{B^{уст}}{S}$$

Средний расход топлива в горелке котла  $B^{стац}$  на стационарном режиме рассчитывается из теплового баланса котла по (1) при  $dQ_2 = 0$ , т. е. при  $dQ_1 = dQ_3$  можно представить следующим образом:

$$B^{стац} = \frac{Q_{ном}^{окр.ср}}{Q_p^p \eta_\kappa} = \frac{kF(\theta - \vartheta_0)}{Q_p^p \eta_\kappa} = \frac{kF\kappa(\vartheta^{стац} - \vartheta_0)}{Q_p^p \eta_\kappa} \quad (12)$$

$$\vartheta^{стац} = \vartheta_0 + \frac{Q_{ном}^{окр.ср}}{kF\kappa}$$

где  $Q_p^p$  – располагаемое тепло в котле (поступающее тепло в котел);  $\eta_k$  – КПД котла.

Вернемся к выражениям (1) и (2). Для дальнейшего доказательства нас будет интересовать слагаемое  $dQ_3$ . Как было указано выше,  $dQ_3 = kF(\theta - \vartheta_0)dt = kF \cdot \kappa(\vartheta - \vartheta_0)dt$ . Но теперь у нас есть выражение (5) для расчета значений текущей температуры  $\vartheta$  в функции времени. Таким образом,

$$dQ_3 = kF(\theta - \vartheta_0)dt = kF \cdot \kappa \left[ \vartheta_{уст} - (\vartheta_{уст} - \vartheta_{нач}) \cdot e^{-t\kappa/T} - \vartheta_0 \right] dt \quad (13)$$

Для определения количества теплоты  $Q_3$  найдем первообразную функцию от выражения (13):

$$\begin{aligned} Q_3 &= \int dQ_3 = kF \cdot \kappa \int \left[ \vartheta_{уст} - (\vartheta_{уст} - \vartheta_{нач}) \cdot e^{-t\kappa/T} - \vartheta_0 \right] dt = \\ &= kF \cdot \kappa \left[ (\vartheta_{нач} - \vartheta_{уст}) \left( -\frac{T}{\kappa} \right) e^{-\frac{t\kappa}{T}} + (\vartheta_{уст} - \vartheta_0) \cdot t \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Согласно (14) количество тепла, переданное окружающей среде за время от 0 до  $\tau_{умн}$

$$\begin{aligned} Q_3^{умн} &= \int_0^{\tau_{умн}} dQ_3 = kF \cdot \kappa \int_0^{\tau_{умн}} \left[ \vartheta_{уст}^{умн} - (\vartheta_{уст}^{умн} - \vartheta_{нач}^{умн}) \cdot e^{-t\kappa/T} - \vartheta_0 \right] dt = \\ &= kF \cdot \kappa \left[ (\vartheta_{нач}^{умн} - \vartheta_{уст}^{умн}) \left( -\frac{T}{\kappa} \right) \left( e^{-\frac{\tau_{умн}\kappa}{T}} - 1 \right) + (\vartheta_{уст}^{умн} - \vartheta_0) \tau_{умн} \right]. \end{aligned}$$

За время от 0 до  $\tau_{паузы}$

$$\begin{aligned} Q_3^{паузы} &= \int_0^{\tau_{паузы}} dQ_3 = kF \cdot \kappa \int_0^{\tau_{паузы}} \left[ \vartheta_{уст}^{паузы} - (\vartheta_{уст}^{паузы} - \vartheta_{нач}^{паузы}) \cdot e^{-t\kappa/T} - \vartheta_0 \right] dt = \\ &= kF \cdot \kappa \left[ (\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_{уст}^{паузы}) \left( -\frac{T}{\kappa} \right) \left( e^{-\frac{\tau_{паузы}\kappa}{T}} - 1 \right) + (\vartheta_{уст}^{паузы} - \vartheta_0) \tau_{паузы} \right]. \end{aligned}$$

Произведем сравнение количества тепловой энергии, переданной окружающей среде по традиционному непрерывному нагреву при неизменной температуре теплоносителя за время от 0 до  $\tau_{периода}$  (при равенстве слагаемого в уравнении сохранения (1)  $dQ_2 = 0$ ), и количества теплоты  $Q_3^{умн} + Q_3^{паузы}$ , переданное по рекомендуемому способу импульсного нагрева от начальной температуры  $\vartheta_{нач}$  до температуры, которую примет теплоноситель в результате нагрева и охлаждения за время 0 до  $\tau_{умн}$  и от 0 до  $\tau_{паузы}$ , т. е. за все время  $\tau_{периода}$ . Обозначим первое количество теплоты символом  $Q_3^{(2)}$ , второе – символом  $Q_3^{(1)}$ . Для справедливости неравенства  $Q_3^{(2)} > Q_3^{(1)}$  необходимо, чтобы  $Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} > 0$ . В результате будем иметь:

$$\begin{aligned} Q_3^{(1)} &= kF \cdot \kappa \left[ (\vartheta_{нач}^{умн} - \vartheta_{уст}^{умн}) \left( -\frac{T}{\kappa} \right) \left( e^{-\frac{\tau_{умн}\kappa}{T}} - 1 \right) + (\vartheta_{уст}^{умн} - \vartheta_0) \tau_{умн} \right] + \\ &+ kF \cdot \kappa \left[ (\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_{уст}^{паузы}) \left( -\frac{T}{\kappa} \right) \left( e^{-\frac{\tau_{паузы}\kappa}{T}} - 1 \right) + (\vartheta_{уст}^{паузы} - \vartheta_0) \tau_{паузы} \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

$$Q_3^{(2)} = \int_0^{\tau_{периода}} dQ_3 = \int_0^{\tau_{периода}} kF(\theta - \vartheta_0)dt = kF \cdot \kappa(\vartheta - \vartheta_0) \int_0^{\tau_{периода}} dt = kF \cdot \kappa(\vartheta - \vartheta_0)\tau_{периода} \quad (16)$$

или

$$Q_3^{(2)} = kF(\theta - \vartheta_0)\tau_{периода},$$

при этом температура теплоносителя по (12)

$$\vartheta = \vartheta^{стат} = \vartheta_0 + \frac{Q_{окр.сп}}{kF\kappa} = \vartheta_0 + \frac{B^{стат} Q_n^p \eta_k}{kF\kappa}.$$

Для сравнения значений  $Q_3^{(1)}$  и  $Q_3^{(2)}$ , полученных по выражениям (15) и (16), соответственно, найдем их разность:

$$\Delta Q_3 = Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} = kF \cdot \kappa \cdot \tau_{\text{періода}} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \mathcal{G} + \left( \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}} - \mathcal{G}_{\text{уст}}^{\text{имп}} \left( \frac{T}{\kappa \tau_{\text{періода}}} \right) \left( e^{-\frac{\tau_{\text{имп}} \kappa}{T}} - 1 \right) - \frac{\mathcal{G}_{\text{уст}}^{\text{имп}}}{S} \right) + \right. \\ & \left. + \left( \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_{\text{уст}}^{\text{паузы}} \left( \frac{T}{\kappa \tau_{\text{періода}}} \right) \left( e^{-\frac{\tau_{\text{паузы}} \kappa}{T}} - 1 \right) - \frac{(S-1) \mathcal{G}_{\text{уст}}^{\text{паузы}}}{S} \right) \right] \end{aligned} \right\} > 0. \quad (17)$$

При этом  $\mathcal{G}_{\text{уст}}^{\text{имп}} = \frac{P}{\kappa \cdot kF} + \mathcal{G}_0$ ,  $\mathcal{G}_{\text{уст}}^{\text{паузы}} = \mathcal{G}_0$ ,  $T = \frac{mc}{kF}$ ,  $\kappa = \frac{1}{1 + \kappa_0} = \frac{1}{1 + \frac{k_{\text{нагр}} F_{\text{нагр}}}{kF}}$ ,  $\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} = \mathcal{G}_{\text{кон}}^{\text{имп}}$ ,

$$e^{-\frac{\tau_{\text{имп}} \kappa}{T}} = e^{-\ln \left( \frac{\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0}{\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0} \right) - \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}}} = \frac{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0 \right) - \mathcal{G}}{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0 \right) - \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}}}; e^{-\frac{\tau_{\text{паузы}} \kappa}{T}} = e^{-\ln \frac{\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0}{\mathcal{G} - \mathcal{G}_0}} = \frac{\mathcal{G} - \mathcal{G}_0}{\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0}.$$

Сомножители  $kF \cdot \kappa \cdot \tau_{\text{періода}} > 0$  и  $\mathcal{G}_{\text{нач}} - \mathcal{G}_{\text{уст}} > 0$ . Для справедливости неравенства  $Q_3^{(2)} > Q_3^{(1)}$  необходимо, чтобы  $Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} > 0$ , что будет соблюдаться при условии

$$\begin{aligned} & \mathcal{G} + \left[ \left( \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}} - \frac{P}{\kappa \cdot kF} - \mathcal{G}_0 \right) \left( \frac{T}{\kappa \tau_{\text{періода}}} \right) \left( \frac{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0 \right) - \mathcal{G}}{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0 \right) - \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}}} - 1 \right) - \frac{\frac{P}{\kappa \cdot kF} + \mathcal{G}_0}{S} \right] + \\ & + \left[ \left( \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0 \right) \left( \frac{T}{\kappa \tau_{\text{періода}}} \right) \left( \frac{\mathcal{G} - \mathcal{G}_0}{\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0} - 1 \right) - \frac{(S-1) \mathcal{G}_0}{S} \right] > 0. \end{aligned}$$

Тогда, преобразуя последнее выражение с учетом выше приведенных соотношений, и для простоты принимая равенство  $\mathcal{G} = \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}}$ , что несколько завышает показатели эффективности применения импульсного режима подвода тепла к теплоносителю, получим

$$\begin{aligned} & \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} + \frac{P}{\kappa \cdot kF} \left( \frac{T}{\kappa \tau_{\text{періода}}} \right) \left[ 1 - \frac{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0 \right) - \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}}}{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \mathcal{G}_0 \right) - \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}}} \right] + \frac{(1-S) \mathcal{G}_0}{S} - \frac{\frac{P}{\kappa \cdot kF} + \mathcal{G}_0}{S} - \\ & - \left( \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0 \right) \left( \frac{T}{\kappa \tau_{\text{періода}}} \right) > 0. \end{aligned} \quad (18)$$

т. е. необходимым и обязательным условием для выполнения неравенства  $Q_3^{(2)} - Q_3^{(1)} > 0$  является

$$\tau_{\text{періода}} > A + B \tau_{\text{имп}}; \quad (19)$$

$$A = \frac{mc \left[ \left( \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0 \right) - \frac{\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}}}{1 + \frac{\mathcal{G}_0}{P / (\kappa \cdot kF)}} \right]}{\kappa \cdot kF (\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0)}; B = \frac{P}{\kappa \cdot kF (\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0)},$$

а скважность импульсов в соответствии с (8) должна соответствовать условию  $S > \frac{A}{\tau_{\text{имп}}} + B$ . При этом практически всегда выполняется неравенство

$$\left( \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_0 \right) > \frac{\mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{паузы}} - \mathcal{G}_{\text{нач}}^{\text{имп}}}{1 + \frac{\mathcal{G}_0}{P / (\kappa \cdot kF)}}.$$



Отсюда продолжительность импульса подвода тепла к системе отопления (теплоснабжения) здания, при принятых допущениях, должна соответствовать условию

$$\tau_{имп} < \frac{\tau_{периода} - A}{B}, \quad (20)$$

а частота цикла (процесса)

$$\omega = \tau_{периода}^{-1} < \frac{\kappa \cdot kF (\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_0)}{mc \left[ (\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_0) - \frac{\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_{нач}^{имп}}{1 + \frac{\vartheta_0}{P/(\kappa \cdot kF)}} \right] + P \cdot \tau_{имп}}. \quad (21)$$

При соблюдении условий (20) и (21) импульсный режим подвода тепла к теплоносителю (системе отопления и т. п.), как независимый самостоятельный фактор влияния, является более экономичным, чем безимпульсный режим.

В предельном случае при гипотетическом равенстве  $\frac{P}{\kappa \cdot kF} = 0$ , последнее выражение примет вид

$$(\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_0) - (\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_0) \left( \frac{T}{\kappa \tau_{периода}} \right) > 0 \text{ или } (\vartheta_{нач}^{паузы} - \vartheta_0) \left( 1 - \frac{T}{\kappa \tau_{периода}} \right) > 0,$$

откуда  $\tau_{периода} > \frac{T}{\kappa}$ , а частота  $\omega < \frac{\kappa}{T}$ , т. е. при любом действительном значении  $\tau_{периода} > \frac{mc}{\kappa \cdot kF}$  и с учетом того, что  $\tau$  (время) всегда положительно, можно сделать вывод о выполнении неравенства  $Q_3^{(2)} > Q_3^{(1)}$  при соблюдении условия (20) или (21).

Полученные результаты позволяют утверждать, что подвод тепла в отопительной системе в импульсном режиме с энергетической точки зрения может быть более рациональным при представленных выше условиях. Объем тепловой энергии, снятой с теплообменника (котла) при поочередных импульсных подключениях, например, горелочных устройств, оказывается большим, чем при использовании безимпульсного подогрева в течение того же времени и при той же средней температуре воздуха в помещении, что приводит, согласно (9) и (10), к сокращению расхода топлива в котле. Кроме того, увеличение мощности теплоподвода, т. е. роста  $\kappa \vartheta_{уст}$ , приводит еще к более эффективному режиму импульсного подвода тепла. Последнее обстоятельство может несколько снижать уровень комфортности в жилых помещениях при росте температуры теплоносителя.

Из соотношения для определения периода включения  $\tau_{периода}$  – отрезка времени между началами двух последовательных импульсов можно определить величину частоты подвода тепла (импульсов),  $c^{-1}$

$$\omega = \frac{1}{\tau_{периода}} = \kappa \frac{kF}{mc} \left[ \ln \frac{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta_{нач.имп}}{\left( \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0 \right) - \vartheta_{кон.имп}} + \ln \frac{\vartheta_{нач.паузы} - \vartheta_0}{\vartheta_{кон.паузы} - \vartheta_0} \right]^{-1}. \quad (22)$$

Из (22) следует, что на частоту импульсов влияет температура окружающей среды, поверхность нагрева теплообменников внутри помещений (батарей), расположенных в помещении, количество теплоносителя в отопительной системе, поверхность ограждающих стен, а также мощность подвода тепла и начальная и конечная температуры подогрева теплоносителя (амплитудная характеристика системы).

Последняя статья воздействия, зависящая от задатчика температуры, влияет также на частоту подвода тепла при всех остальных неизменных параметрах системы отопления и теплопередачи. Кроме того, увеличение частоты импульсов  $\omega$  при снижении температуры «потолка нагрева» снижает эффективность теплоподвода, т. к. при этом снижается амплитуда измене-

ния температуры (сглаживание) приводит к перерасходу топлива в связи с поддержанием необходимой температуры внутри обогреваемого помещения.

Следует особо отметить, что для поддержания более эффективной работы системы отопления на область изменения частоты импульсов накладывается ограничение (20), (21).

Таким образом, определены длительности подвода тепла и паузы между импульсами, а также скважность импульсов, в зависимости от поверхности нагрева отопительных приборов в зданиях и тепловых потерь в окружающую среду, оценены амплитудно-частотные характеристики импульсного режима подвода тепла в системе отопления.

Предлагаемый метод нагрева теплоносителя должен, по возможности, осуществляться в условиях наибольшей разности температур, что позволяет заметно интенсифицировать процесс теплообмена в источнике тепла за счет роста значения коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением в этих условиях.

### Выводы

1. С использованием представленной аналитической модели системы импульсного отопления зданий определены основные параметры режима импульсного нагрева теплоносителя.
2. Для повышения эффективности работы системы отопления с импульсным нагревом теплоносителя необходимо выдерживать определенное соотношение между длительностью импульса нагрева и периода включения, продолжительность нагрева теплоносителя в импульсном режиме не должна достигать продолжительности переходного процесса нагрева при традиционном способе подвода теплоты.
3. Полученные результаты разработки инженерной методики для расчета функциональных параметров импульсного подвода тепла к системам отопления зданий позволяет осуществлять выбор более эффективных конструктивных их характеристик при проектировании систем теплоснабжения и способов эксплуатации, в т. ч. теплогенераторов на соответствующую тепловую мощность.
4. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является учет тепло- и массообмена в топке котельного агрегата при различных интенсивностях импульсного теплоподвода, влияния скорости циркуляции теплоносителя в системе отопления, что позволит получить более полную картину передачи тепла и разработать более эффективные методики импульсного подвода тепла в системах отопления зданий.

### Список использованных источников:

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение / Б.В. Раушенбах. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 498 с.
2. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре [и др.]. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 491 с.
3. Кацнельсон Б.Д. Сжигание топлива в пульсирующем потоке / Б.Д. Кацнельсон, А.А. Таракановский // Теория и практика пульсационного горения : Тр. ЦКТИ. – Л., 1965. – Вып. 64. – С. 3-7.
4. Исследование теплового режима нагревательного колодца с одной верхней горелкой при импульсном отоплении / М.А. Глинков, В.Ю. Каганов, Ш. Энекеш, Б. Габор, Т. Сарка // Сталь. – 1973. – № 2. – С. 171-173.
5. Работа нагревательных колодцев с верхней горелкой при пульсирующем факеле / Е.А. Капустин, Ю.Н. Шаламов, А.М. Кулаков, П.Т. Кривенко, А.И. Киселев // Сталь. – 1980. – № 2. – С. 1105-1107.
6. Ревун М.П. Интенсификация работы нагревательных печей // М.П. Ревун, В.И. Гранковский, А.Н. Байбуз. – К. : Техніка, 1987. – 136 с.
7. Ревун М.П. Новые схемы импульсного отопления нагревательных и термических печей / М.П. Ревун, Е.Н. Барищенко, А.И. Чепрасов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2005. – № 3. – С. 97-100.
8. Прибытков И.А. О распределении тепловой нагрузки при импульсно-скоростном нагреве металла / И.А. Прибытков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 7. – С. 66-69.
9. Изотов Б.В. Математическое моделирование тепловой работы методической печи с импульсным отоплением / Б.В. Изотов, Ю.Н. Шаламов, А.С. Безчерев // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2009. – Вип. 19. – С. 222-226.

10. Импульсный режим подключения грунтовых теплообменников в теплонасосных отопительных системах / С.А. Андреев, В.И. Загинайлов, Т.В. Иванова, Е.А. Флегонтов // Вестник Федерального Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». – 2015. – № 6 (70). – С. 39-44.
11. Таймаров М.А. Котёл пульсирующего горения природных и пиролизных газов / М.А. Таймаров, М.Р. Шарипов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 21. – С. 133-135.
12. Сеницын А.А. Исследование особенностей работы котла, основанного на пульсирующем горении газообразного топлива / А.А. Сеницын // Нефтегазовое дело. – 2006. – № 2. – С. 1-13.
13. Дегтярь А.Б. Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы / А.Б. Дегтярь, В.И. Панферов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2008. – Вып. 8. – № 17 (117). – С. 41-44. – (Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника).
14. Нагорная А.Н. Моделирование и управление тепловым режимом здания / А.Н. Нагорная, В.И. Панферов, Е.Ю. Пашнина // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: материалы Межд. науч.-техн. конф. – М. : МГСУ, 2005. – С. 94-98.
15. Панферов В.И. Погрешность определения среднего значения температурного напора отопительного прибора / В.И. Панферов, А.Б. Дегтярь, Ю.Н. Денисенко // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы 5-й Рос. науч.-техн. конф. – Ульяновск : УлГТУ, 2006. – Т. 1. – С. 190-194.
16. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для ВУЗов / Е.Я. Соколов. – М. : Изд-во МЭИ, 1999. – 472 с.
17. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим / Г.М. Кондратьев. – М. : Гостехтеоретиздат, 1954. – 408 с.
18. Черпаков П.В. Теория регулярного теплообмена / П.В. Черпаков. – М. : Энергия, 1975. – 225 с.

#### References:

1. Raushenbakh B.V. *Vibratsionnoye gorenije* [Vibration combustion]. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature Publ., 1961. 498 p. (Rus.)
2. Knorre G.F., Aref'ev K.M., Blokh A.G. *Teoriya topochnykh protsessov* [The theory of furnace processes]. Moscow-Leningrad, Energia Publ., 1966. 491 p. (Rus.)
3. Katsnel'son B.D. Szhiganiye topliva v pul'siruyushchem potoke [Combustion of fuel in pulsating flow]. *Teoriya i praktika pul'satsionnogo gorenija: Tr. TSKTI – Theory and practice of pulsating combustion: Works of CKTI*, 1965, iss. 64, pp. 3-7. (Rus.)
4. Glinkov M.A., Kaganov V.Yu., Enekesh Sh., Gabor B., Sarka T. Issledovaniye teplovogo rezhima nagrevatel'nogo kolodtsa s odnoy verkhney gorelkoy pri impul'snom otoplenii [Investigation of the thermal conditions of a heating well with a single top burner under pulsed heating]. *Stal' – Steel*, 1973, no. 2, pp. 171-173. (Rus.)
5. Kapustin Ye.A., Shalamov Yu.N., Kulakov A.M., Krivenko P.T., Kiselev A.I. Rabota nagrevatel'nykh kolodtsev s verkhney gorelkoy pri pul'siruyushchem fakele [Work of heating wells with an upper burner with a pulsating flame]. *Stal' – Steel*, 1980, no. 2, pp. 1105-1107. (Rus.)
6. Revun M.P., Grankovskiy V.I., Baybuz A.N. *Intensifikatsiya raboty nagrevatel'nykh pechey* [Intensification of the operation of heating furnaces]. Kiev, Equipment Publ, 1987. 136 p. (Rus.)
7. Revun M.P., Barishenko Ye.N., Cheprasov A.I. Novyye skhemy impul'snogo otopleniya nagrevatel'nykh i termicheskikh pechey [New schemes of pulse heating of heating and thermal furnaces]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2005, no. 3, pp. 97-100. (Rus.)
8. Pribytkov I.A. O raspredelenii teplovoy nagruzki pri impul'sno-skorostnom nagreve metalla [On the distribution of thermal load during pulse-speed heating of metal]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya – News of high schools. Ferrous metallurgy*, 1997, no. 7, pp. 66-69. (Rus.)
9. Izotov B.V., Shalamov Yu.N., Bezcherev A.S. Matematicheskoye modelirovaniye teplovoy raboty metodicheskoy pechi s impul'snym otopleniyem [Mathematical modeling of thermal work of a

- methodical furnace with impulse heating]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu – Reporter of the Priazovskiy State Technical University*, 2009, iss. 19, pp. 222-226. (Rus.)
10. Andreyev S.A., Zaginaylov V.I., Ivanova T.V., Flegontov Ye.A. Impul'snyy rezhim podklyucheniya gruntovykh teploobmennikov v teplonasosnykh otopitel'nykh sistemakh [Pulsed mode of connection of ground heat exchangers in heat pump heating systems]. *Vestnik Federal'nogo Gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V.P. Goryachkina» – Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education «Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin»*, 2015, no. 6 (70), pp. 39-44. (Rus.)
  11. Taymarov M. A., Sharipov M. R. Kotol pul'siruyushchego goreniya prirodnykh i piroliznykh gazov [Boiler of pulsating combustion of natural and pyrolysis gases]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of Kazan Technological University*, 2013, vol. 16, no. 21, pp. 133-135. (Rus.)
  12. Sinitsyn A.A. Issledovaniye osobennostey raboty kotla, osnovannogo na pul'siruyushchem gorenii gazoobraznogo topliva [Investigation of the peculiarities of the operation of the boiler based on the pulsating combustion of gaseous fuels]. *Neftegazovoye delo – Oil and Gas Business*, 2006, no. 2, pp. 1-13. (Rus.)
  13. Degtyar' A.B., Panferov V.I. Postroyeniye algoritma impul'snogo otopleniya zdaniy i issledovaniye rezhimov yego raboty [Construction of an algorithm for pulsed heating of buildings and study of its operating modes]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika» – Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics*, 2008, iss. 8, no. 17 (117), pp. 41-44. (Rus.)
  14. Nagornaya A.N., Panferov V.I., Pashnina Ye.Yu. Modelirovanie i upravlenie teplovym rezhimom zdaniia. *Materialy Mezhd. nauch.-tekh. konf. «Teoreticheskiye osnovy teplogazosnabzheniya i ventilyatsii»* [Modeling and control of the thermal regime of the building. Proceedings of the Int. Sci.-Tech. Conf. «Theoretical Foundations of Heat and Gas Supply and Ventilation»]. Moscow, MGSU, 2005, pp. 94-98. (Rus.)
  15. Panferov V.I., Degtyar' A.B., Denisenko Yu.N. Pogreshnost' opredeleniia srednego znacheniiia temperaturnogo napora otopitel'nogo pribora. *Materialy 5-i Ross. nauch.-tekh. konf. «Energoberezheniye v gorodskom khozyaystve, energetike, promyshlennosti»* [The error in determining the average value of the temperature head of the heater. Proceedings of the 5th Russ. sci-tech. conf. «Energy saving in the city economy, energy, industry»]. Ul'yanovsk, UIGTU, 2006, vol. 1, pp. 190-194. (Rus.)
  16. Sokolov Ye.Ya. *Teplofikatsiya i teplovyye seti: uchebnyk dlya vuzov* [Heating and heating networks: a textbook for universities]. Moscow, Publishing house of the Moscow Power Engineering Institute Publ., 1999. 472 p. (Rus.)
  17. Kondrat'yev G.M. *Regulyarnyy teplovoy rezhim* [Regular thermal conditions]. Moscow, Gostekhteorizdat Publ., 1954, 408 p. (Rus.)
  18. Cherpakov P.V. *Teoriya regulyarnogo teploobmena* [Theory of regular heat exchange]. Moscow, Energy Publ., 1975, 225 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов

д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.04.2018