

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ

А.А. Февралев, В.В. Гибадуллина

С помощью метода последовательных приближений разработана математическая модель пластинчатого теплообменника, позволяющая определять его основные характеристики. На основе модели разработана программа, позволяющая исследовать работу пластинчатого теплообменника. Построены графики различных эксплуатационных режимов. Исследовано влияние загрязнений на режим работы пластинчатого теплообменника.

Ключевые слова: математическое моделирование, пластинчатый теплообменник, метод последовательных приближений.

Введение

На сегодняшний день современный индивидуальный тепловой пункт (далее ИТП) в большинстве случаев оборудуется пластинчатыми теплообменниками (далее ПТО). Федеральный закон от 27.07.2010 № 190-ФЗ «О теплоснабжении» [4] гласит, что применение ПТО на горячее водоснабжение (далее ГВС) обязательно, открытые схемы запрещены к использованию. К тому же использование независимых схем на системы отопления и вентиляции также имеет множество преимуществ по сравнению с открытыми схемами. Соответственно, качественная математическая модель ПТО необходима для исследования работы ИТП в комплексе.

1. Моделирование ПТО

Моделирование ПТО осуществляется с помощью метода последовательных приближений (далее МПП). Для расчетов используют формулу, в которую входит не средняя разность температур между теплообменивающимися потоками (средний логарифмический температурный напор Δt_{\ln}), а разность температур греющего и нагреваемого теплоносителя на входе в теплообменник [1].

Для этого используют противоточный коэффициент Z . Вывод формулы следует из уравнения теплового баланса и уравнения теплопередачи.

Рассматривается элементарный участок dF (рис. 1).

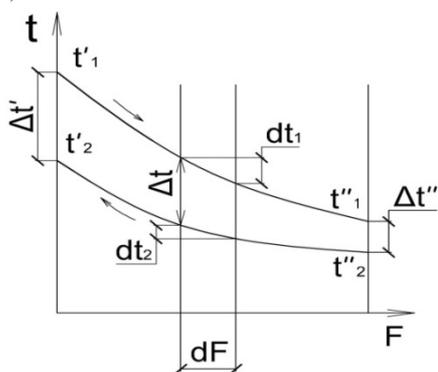


Рис. 1. График изменения температуры теплоносителей по площади ПТО

Из уравнения теплопередачи:

$$dQ = q \cdot dF = K \cdot \Delta t \cdot dF, \quad (1)$$

где dQ – количество теплоты, передаваемое от первичного теплоносителя к вторичному в единицу времени dt ; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); Δt – разность температур первичного и вторичного теплоносителей, °С.

и закона сохранения энергии:

$$\begin{cases} dQ = -C_1 \cdot dt_1; \\ dQ = -C_2 \cdot dt_2, \end{cases} \quad (2)$$

где $C = G_m \cdot \overline{C_p}$ – полная теплоемкость массового расхода, Дж/К; определяется отношением:

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = m \cdot K \cdot dF, \quad (3)$$

Здесь $m = \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right)$ – введенная замена. Далее

интегрируют (3) и получают:

$$\ln(\Delta t) = -m \cdot K \cdot F + C^*. \quad (4)$$

Подставляя граничное условие $F_0=0$ в уравнение (4), получают:

$$\frac{\Delta t''}{\Delta t'} = e^{-m \cdot K \cdot F}, \quad (5)$$

причем $\begin{cases} \Delta t' = t'_1 - t'_2; \\ \Delta t'' = t''_1 - t''_2, \end{cases}$

где $\Delta t'$ – максимальная разность температур греющего теплоносителя на входе и на выходе ПТО, °С; $\Delta t''$ – максимальная разность температур нагреваемого теплоносителя на входе и на выходе ПТО, °С.

Уравнение (5) переписывают следующим образом:

$$\frac{(t'_1 - t'_2) \left(1 - e^{-\left(1 - \frac{C_1}{C_2}\right) \frac{K \cdot F}{C_1}} \right)}{1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot e^{-\left(1 - \frac{C_1}{C_2}\right) \frac{K \cdot F}{C_1}}} = t'_1 - t''_1. \quad (6)$$

Полученное отношение

$$\frac{\left(1 - e^{-\left(1 - \frac{C_1}{C_2}\right) \frac{K \cdot F}{C_1}}\right)}{1 - \frac{C_1}{C_2} \cdot e^{-\left(1 - \frac{C_1}{C_2}\right) \frac{K \cdot F}{C_1}}} \quad (7)$$

является протivotочным коэффициентом Z .

Следовательно, мощность будет находиться по формуле:

$$Q = C_1 \cdot Z \cdot (t_1' - t_2''). \quad (8)$$

2. Описание метода последовательных приближений

В процессе подбора ПТО невозможно выбрать в точности соответствующий заданным параметрам. К тому же, во время эксплуатации реальные параметры (расход и температуры на входе в ПТО) будут отличаться от расчетных. Для определения эксплуатационных характеристик ПТО (мощность и температуры на выходе из ПТО) используют метод последовательных приближений (далее МПП).

Далее приведена методика расчета основных характеристик ПТО с помощью МПП:

1. Рассчитывается протivotочный коэффициент Z по формуле (7).

2. Определяется действительная мощность ПТО по формуле (8).

3. Действительные температуры теплоносителей на выходе:

$$t_1'' = t_1' - \frac{Q}{C_1}; \quad (9)$$

$$t_2'' = t_2' + \frac{Q}{C_2}. \quad (10)$$

4. С учетом изменяющихся температур находятся коэффициенты теплоотдачи по эмпирической формуле.

5. По определяемым коэффициентам теплоотдачи находится новое значение коэффициента теплопередачи:

$$k_{new} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (11)$$

После нахождения новых значений k_{new} цикл МПП повторяют. При равенстве $k = k_{new}$ при следующей итерации цикл МПП прекращают; значения, полученные на данном шаге, являются реальными значениями теплообменного аппарата.

3. Алгоритм программы

По описанной методике разработана программа, которая позволяет моделировать работу ПТО. На основании G_1 , G_2 и t_1' , t_2' (на входе в ПТО) – определяются Q – действительная мощ-

ность, k – коэффициент теплопроводности, t_1'' , t_2'' (на выходе из ПТО) (рис. 2).

Алгоритм программы разработан в соответствии с методикой МПП с использованием 4 входных параметров. Программа производит полный расчет ПТО, на основании стандартных и эмпирических расчетных формул, технических характеристик ПТО, а также используются табличные значения теплоемкостей и плотностей воды.

В результате работы программы определяются значения выходных температур теплоносителей, а также действительная мощность и коэффициент теплопроводности.

4. Анализ данных, получаемых с помощью модели теплообменника

На основе полученных в программе данных построены графики зависимости Q , k , t_1'' и t_2'' от расходов первичного и вторичного теплоносителей (рис. 3 и рис. 4 соответственно).

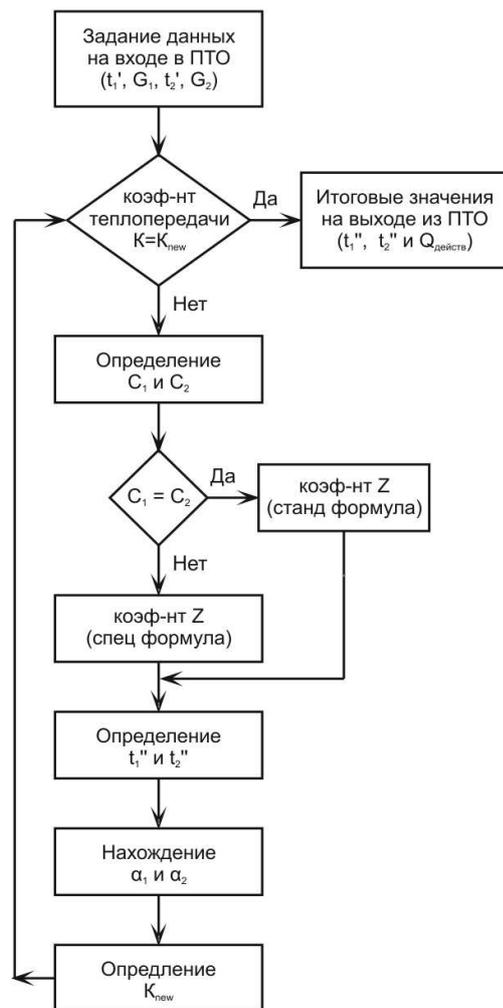


Рис. 2. Алгоритм программы моделирования ПТО

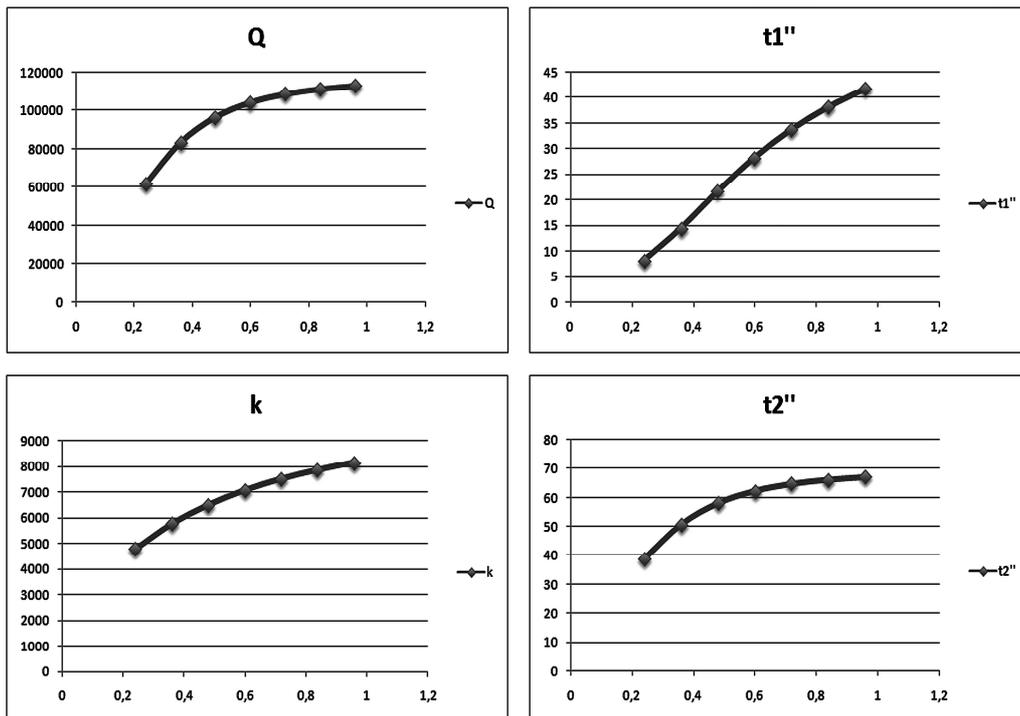


Рис. 3. Графики зависимости Q , k , t_1'' и t_2'' от G_1

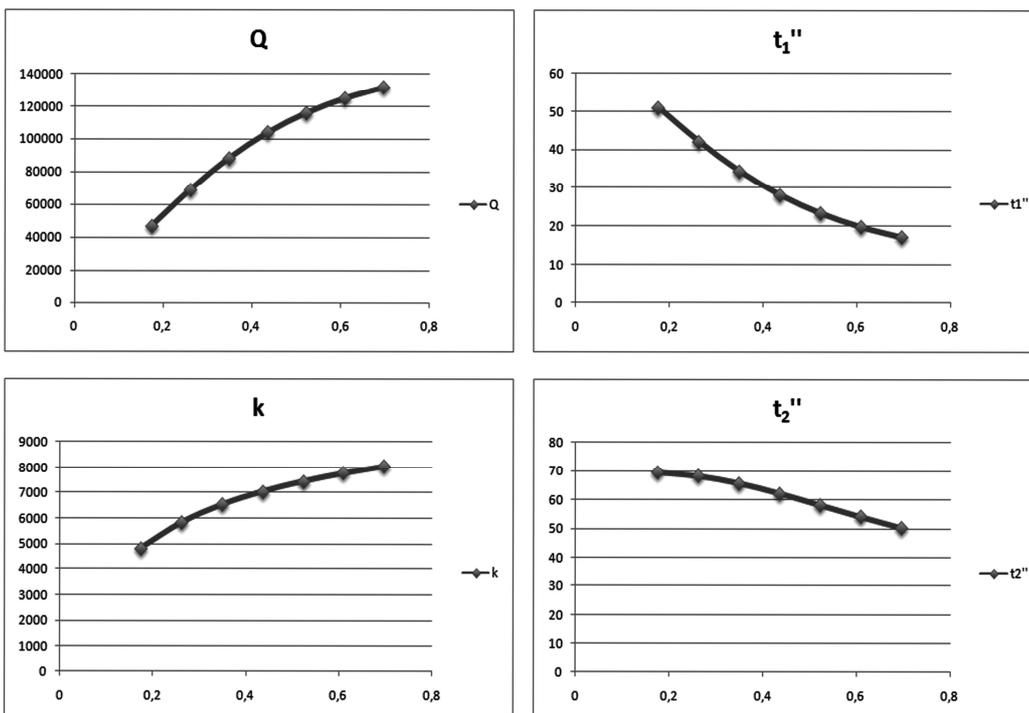


Рис. 4. Графики зависимости Q , k , t_1'' и t_2'' от G_2

Полученные графики отлично соотносятся с реальностью. При увеличении расхода греющего теплоносителя происходит увеличение мощности и температуры греющего и нагреваемого теплоносителя на выходе.

При увеличении расхода нагреваемого теплоносителя происходит увеличение мощности и уменьшение температуры греющего и нагреваемого теплоносителя на выходе.

5. Эксплуатационное моделирование работы ПТО

Наибольший интерес представляет качественное моделирование работы ПТО в реальных эксплуатационных ситуациях. В данной работе произведено моделирование работы ПТО на ГВС жилого здания в течение суток в летний или переходный период года. Для этого использовалась модель ПТО и агентная модель неравномерности водоразбора ГВС жилым зданием [2].

Для расчетов использовались следующие исходные данные:

- G_2 – секундный расход на ГВС жилым зданием (определяется с помощью агентной модели) – это расход нагреваемой среды в ПТО;
- t'_1 – температура греющей среды на входе принимается равной $70\text{ }^\circ\text{C}$, что соответствует летнему температурному графику ТС для Челябинской области;
- t'_2 – температура нагреваемой среды на входе принимается равной $5\text{ }^\circ\text{C}$, стандартная температура ХВС на вводе в жилой дом;

• G_1 – определяется по результатам моделирования. По сути это работа контроллера на ГВС, т. е. при высоком водоразборе увеличивается G_2 , снижается t'_2 . Далее идет сигнал, приоткрывается регулирующий клапан, увеличивается G_1 и наоборот.

Изменение расходов теплоносителей напрямую связано с неравномерностью нагрузки на ГВС. На рис. 5 приведен дневной график работы ПТО в системе ГВС. График представляет собой посекундный расход теплоносителей на ГВС и из ТС. Можно заметить, что пики нагрузки на ПТО приходятся преимущественно на утренние и вечерние часы. Однако амплитуда расхода ГВС в один и тот же момент времени значительно больше амплитуды расхода ТС.

Графики изменения температуры теплоносителей в течение суток будут аналогичными (рис. 6). Температура ГВС в течение суток изменяется в допустимых пределах, график не имеет резких пиков и впадин. Температура ТС на выходе из ПТО также имеет практически монотонный

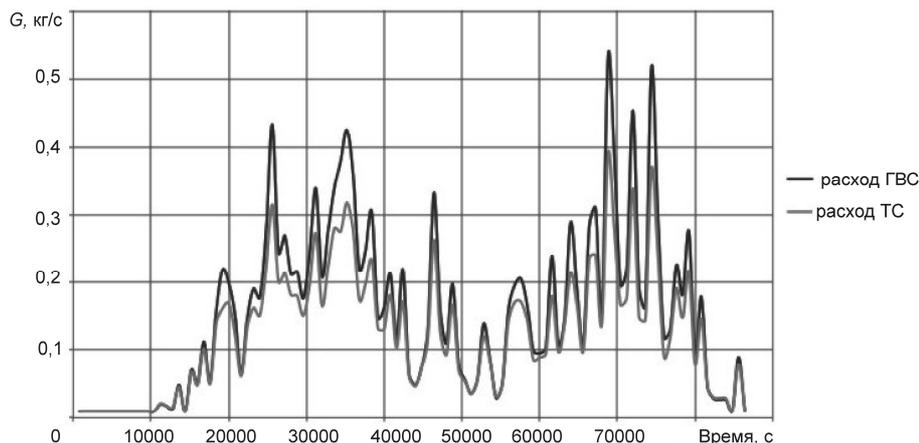


Рис. 5. Дневной график работы пластинчатого теплообменника ГВС

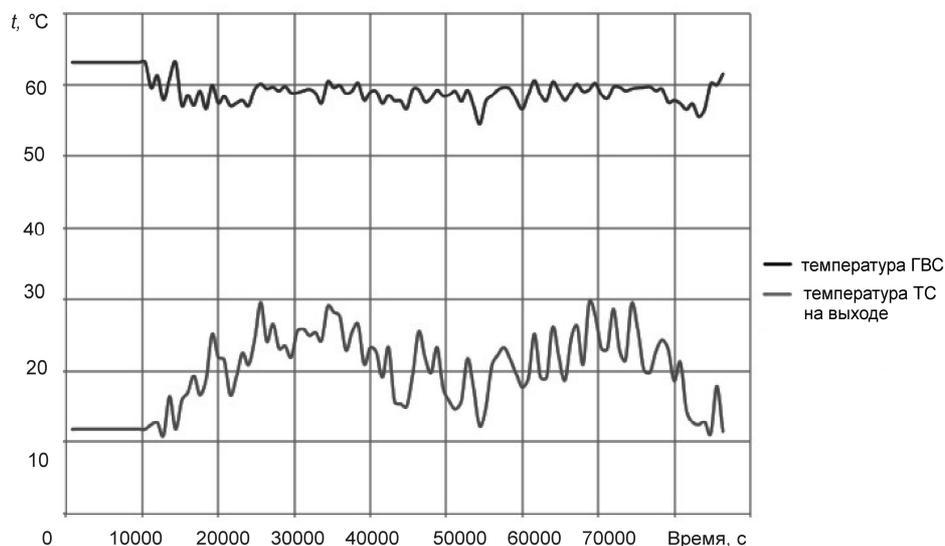


Рис. 6. График суточного изменения температуры теплоносителей

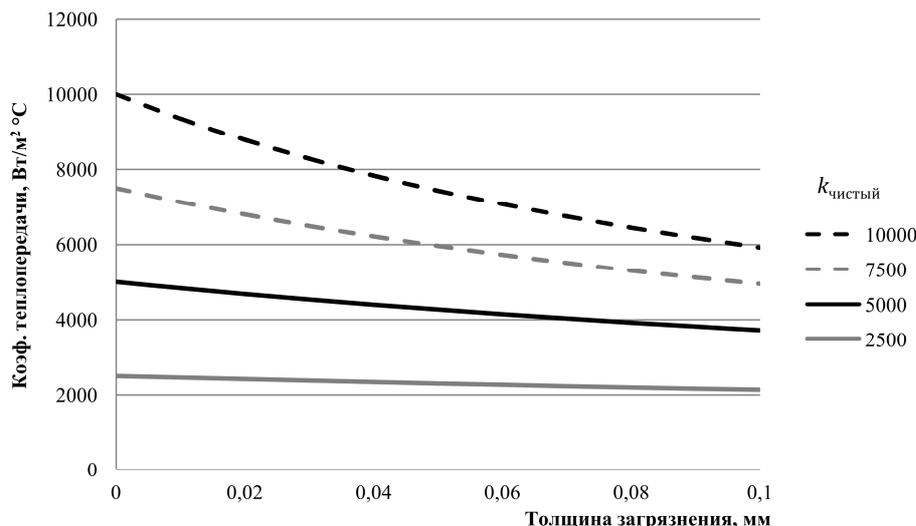


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопередачи от толщины загрязнения

характер, но уже больший разброс температур в течение суток в сравнении с графиком изменения температуры ГВС.

6. Влияние загрязнения на коэффициент теплопередачи

Часто одним из достоинств ПТО отмечается высокий коэффициент теплопроводности. Необходимо отметить, что завышение коэффициента k может привести к негативным последствиям во время эксплуатации. На основании разработанной модели и программы были получены данные, которые позволяют наглядно оценить влияние загрязнения на коэффициент k (рис. 7).

Коэффициент теплопроводности накипи $\lambda_{\text{н}} = 1,75 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, соответственно для ржавчины $\lambda_{\text{рж}} = 1,15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ [3], тогда допустимо принять $\lambda_{\text{загр}} = 1,45 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$.

Влияние загрязнений на коэффициент теплопередачи k можно рассмотреть и с математической точки зрения. В стандартную формулу вычисления k (11) добавляется дополнительное сопротивление – сопротивление теплопередачи слоя загрязнения. Тогда формула для определения k (коэффициент теплопередачи) с учетом загрязнения примет вид:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_{\text{загр.}}}{\lambda_{\text{загр.}}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (12)$$

На графике видно, чем больше величина k , тем выше угол наклона кривой, т. е. выше влияние

загрязнения на коэффициент теплопередачи. Данный график наглядно демонстрирует, что излишнее завышение k приводит к высокой зависимости теплообменника от загрязнения.

Заключение

Предложена математическая модель пластинчатого теплообменника, на основе которой разработана программа, позволяющая не только моделировать работу ПТО, но и анализировать работу ПТО в реальных эксплуатационных режимах. На основе полученных данных построена серия графиков, которые хорошо соотносятся с реальностью. Данная работа может быть использована для более глубокого исследования и моделирования индивидуального теплового пункта.

Литература

1. Соколов, Е.Я. *Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов / Е.Я. Соколов. – 7-е изд. стер. – М.: МЭИ, 2001.*
2. Февралев, А.А. *Имитационное моделирование неравномерности водоразбора жильем зданием агентным методом // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 39–43.*
3. Авчухов, В.В. *Задачник по процессам тепломассообмена: учеб. пособие для вузов / В.В. Авчухов, Б.Я. Паюсте. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 102.*
4. *Федеральный закон от 27.07.2010 № 190-ФЗ (ред. от 03.02.2014) «О теплоснабжении».*

Февралев Алексей Андреевич, региональный представитель ЗАО «РИДАН», преподаватель кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), fevral25@mail.ru

Гибадуллина Вероника Валерьевна, студент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), GibadullinaVV@yandex.ru

Поступила в редакцию 29 октября 2014 г.

SIMULATION OF PLATE HEAT EXCHANGER. ANALYSIS OF WORKING CONDITIONS

A.A. Fevraley, RIDAN CJSC, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, fevral25@mail.ru
V.V. Gibadullina, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, GibadullinaVV@yandex.ru

With the help of successive approximations method mathematical model of plate heat exchanger, which allows us to determine its main characteristics, is developed. The program developed on the basis of the model allows us to investigate the operation of the heat exchanger. Graphics are built to describe the different operating modes. The influence of impurities on the operation of the plate heat exchanger is analyzed.

Keywords: mathematical modeling, plate heat exchanger, successive approximations method.

References

1. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti* [District heating and heat network]. Moscow, MEI Publ., 2001. 472 p.
2. Fevraley A.A. [Mathematical simulation of the regularity of water consumption by residential building using the methods of agent-based modeling]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction engineering and architecture*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 39–43 (in Russ.).
3. Avchukhov V.V., Payuste B.Ya. *Zadachnik po protsessam teplomassoobmena* [The book of (mathematical) problems on processes heat and mass transfer]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1986. 144 p.
4. Federal'nyj zakon ot 27.07.2010 N 190-FZ (red. ot 03.02.2014) "O teplosnabzhenii" [Federal Law of 27.07.2010 no. 190-FZ (ed. by 02.03.2014) "The heat supply act"]. Moscow, 2014.

Received 29 October 2014