

13. V l a s o v, A. V., Vykhot, S. O., Ganzha, V. A., Davydenko, V. F., Dashkov, G. V., Dikun, V. S., Zhdanov, V. L., Slizhevskaya, Y. M., Pavlyukevich, N. V., Solodukhin, A. D., Fisenko, S. P., & Homich, A. S. (1993) *Cooling Tower*. Patent of the RB No 1293.
14. H e m m a s i a n Kashani, M. M., & Dobrego, K. V. (2013) Heat and Mass Transfer in Natural Draft Cooling Towers. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (5), 1072–1082. doi: 10.1007/s10891-013-0930-z.
15. A N S Y S[®] Academic Research, Release 14.5, Help System, FLUENT, ANSYS, Inc.
16. P a n o f s k y, H. A., & Dutton, J. A. (1984) *Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications*. New York, Wiley Press.
17. P e t r u c h i k, A., & Fisenko, S. (2001) Simulation of Natural Draft Cooling Tower Performance. The 12th IAHR Symposium in Cooling Tower and Heat Exchangers. Sydney, Australia, 80–86.
18. K r ö g e r, D. G., (2004) *Air-Cooled Heat Exchangers and Cooling Towers. Vol. 1*. USA: PennWell Books.
19. V l a s o v, A. V., Dashkov, G. V., Solodukhin, A. D., & Fisenko, S. P. (2002) Investigation of Internal Aerodynamics of Evaporative Cooling Tower. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]*, 75 (5), 64–68 (in Russian). (И с л е д о в а н и е внутренней аэродинамики башенной испарительной градирни / А. В. Власов [и др.] // ИФЖ. – 2002. – Т. 75 (5). – С. 1086–1091.)
20. I s a c h e n k o, V. P., Pavlovich, V. I., Osipova, V. A., & Sukhomel, A. S. (1981) *Heat Transfer*. Moscow, Energy, 292–294 (in Russian). (Т е п л о о б м е н: учеб. для вузов / В. П. Исаченко [и др.]. – М.: Энергия, 1981. – С. 292–294. В печати.)
21. H e m m a s i a n Kashani, M. M., & Dobrego, K. V. (2014) Influence of Flow Rotation Within a Cooling Tower on the Aerodynamic Interaction with Crosswind Flow. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87 (2), 376–383. doi: 10.1007/s10891-014-1023-3.
22. H e m m a s i a n Kashani, M. M., & Dobrego, K. V. (2014) Effect of Inlet Windows Deflectors and Windbreak Walls Height on Performance of Natural Draft Cooling Tower under Cross Wind Condition, *Heat Transfer Research*, in print.
23. S o l o d u k h i n, A. D., & Dashkov G. V. (2011) Research Report № 20113267, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk. (In Russian, Unpublished). (О т ч е т о НИР № 20113267 / А. Д. Солодухин [и др.]; Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, 2011.)

Представлена кафедрой
ПТ и Т

Поступила 07.07.2014

УДК 537.21

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ РАБОТЫ U-ОБРАЗНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРУНТОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Асп. ФИЛАТОВ С. О.

Белорусский государственный технологический университет

E-mail: filatau@tyt.by

Разработана численная модель нестационарного теплового режима вертикального грунтового теплообменника, позволяющая установить изменение во времени его основных параметров: теплового потока, температуры теплоносителя на выходе, усредненное распределение температуры в прилегающем грунте. Предлагаемый подход основан на решении уравнения теплопроводности в нестационарной плоской осесимметричной постановке с граничными условиями, учитывающими параметры грунтового теплообменника и температурный режим грунта на удалении. Решение проводили по методу конечных разностей. Достоверность разработанной модели подтверждается

сравнением расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными на разработанной установке, в которой имитировался нестационарный тепловой режим грунтового теплообменника в виде U-образной трубы, расположенной горизонтально в песчаной среде.

В эксперименте, проводимом в два этапа, было организовано охлаждение воды в грунтовом теплообменнике. На первом этапе определяли теплофизические свойства песка. Теплопроводность песка находили стационарным методом плоского слоя, температуропроводность – методом регулярного режима с применением цилиндрического калориметра. Полученные свойства использовали далее при обработке экспериментальных данных второго этапа – исследование нестационарной работы грунтового теплообменника. Проанализированы результаты четырех экспериментов с различной продолжительностью и характером изменения массового расхода и температуры теплоносителя. Расхождение результатов опыта и расчета по модели для температуры теплоносителя на выходе теплообменника отмечено в диапазоне 0,5–1,8 %, для температуры грунта – 1,0–2,3 %, для теплового потока – 3,6–5,4 %. Результаты экспериментов могут быть использованы для подтверждения достоверности других методов моделирования грунтовых теплообменников. Представленную численную модель можно использовать для анализа работы системы теплоснабжения с тепловыми насосами.

Ключевые слова: U-образный вертикальный грунтовой теплообменник, нестационарная работа, численная модель.

Ил. 4. Библиогр. 22 назв.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF UNSTEADY WORK OF U-SHAPE BOREHOLE HEAT EXCHANGER

FILATAU S. A.

Belorussian State Technological University

Unsteady numerical model of borehole heat exchanger heat regime was developed. General numerical modeling results are borehole heat flux, heat carrier inlet temperature and average soil temperature distribution. Proposed model is based on solution of heat conduction equation in transient plane axially symmetric formulation with boundary conditions for borehole heat exchanger and undisturbed soil domain. Solution method is finite difference method. Numerical model is verified with comparisons numerical results and experimental data from developed laboratory installation for simulation unsteady heat regime of horizontal positioned U-shape ground heat exchanger in sand medium.

Cooling of water is organized in ground exchanger in experiment. Experiment includes two steps. Thermal properties of sand is determined at the first stage. Thermal conductivity of sand is determined by stationary plate method, thermal diffusivity is determined by regular regime method using cylindrical calorimeter. Determined properties are used further in processing of experimental results at second step for analysis of transient work of ground heat exchanger. Results of four experiments are analyzed with different duration and time behavior of mass flow and heat carrier temperature. Divergences of experimental and simulated results for temperature of heat carrier changes in the range 0,5–1,8 %, for sand temperature in the range 1,0–2,3 %, for heat flux in the range 3,6–5,4 %. Experimental results can be used for validation of other simulation methods of ground heat exchangers. Presented numerical model can be used for analyzing of heat supply systems with heat pumps.

Keywords: U-shape borehole heat exchanger, unsteady work, numerical model.

Fig. 4. Ref.: 22 titles.

Введение. Одним из направлений нетрадиционной энергетики являются технологии, основанные на использовании энергетического потенциала грунтового массива, не подверженного сезонным колебаниям температуры. Такие технологии можно разделить на несколько направлений:

- утилизация низкопотенциальной теплоты грунта тепловыми насо-

сами [1, 2];

- сезонное аккумулирование теплоты или холода в грунтовом массиве [3];

- охлаждение и нагрев воздуха в грунтовых теплообменниках [4, 5].

Технические системы, реализующие эти технологии, содержат теплообменные аппараты, распространенным типом которых являются вертикальные грунтовые теплообменники (ВГТО), представляющие собой одну или несколько U-образных труб, помещенных в скважину (рис. 1).

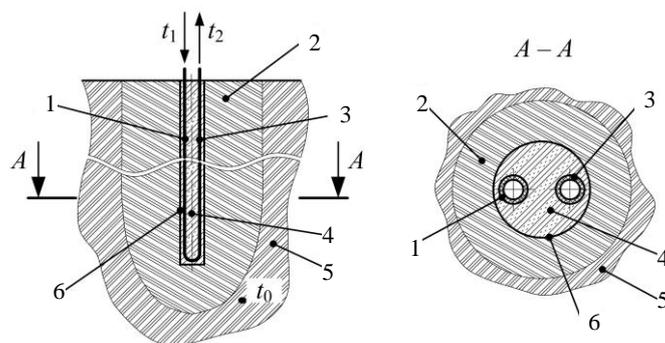


Рис. 1. Вертикальный грунтовый теплообменник: 1 – нисходящая ветвь U-образной трубы; 2 – область грунта, вступающего в тепловое взаимодействие с ВГТО; 3 – восходящая ветвь U-образной трубы; 4 – заполнитель скважины; 5 – область грунта, не вступающего в тепловое взаимодействие с ВГТО; 6 – поверхность скважины

Не занятое трубами внутреннее пространство скважины заполняется специальным составом, как правило, на основе бентонита и цемента, для улучшения термического контакта труб и прилегающего грунта. В зависимости от области применения, жидкий теплоноситель подается на вход ВГТО с температурой выше либо ниже температуры грунта. Вследствие теплового взаимодействия теплоносителя и грунта происходит изменение их температуры во времени. Изменение температуры грунта влияет на параметры работы теплообменника, а соответственно и на показатели работы связанных с ним систем. При проектировании ВГТО требуются определенные данные, которые можно получить расчетным методом.

Известны методы теплового расчета ВГТО в приближении стационарного теплопереноса [6–8]. Все они ограничиваются моделированием теплообмена только в пределах самого ВГТО (задается распределение температуры поверхности скважины), либо принимается, что в прилегающей области грунта имеет место установившееся температурное поле. Недостатком таких моделей является невозможность прогнозирования изменения параметров ВГТО во времени, что часто необходимо на практике. Для проведения анализа используют модели нестационарного теплового режима ВГТО. При этом задача заключается в моделировании совместного теплопереноса в ВГТО и прилегающем массиве грунта.

Если ВГТО расположен в грунте без интенсивного влагопереноса, то численные модели его работы представляют различные решения уравнения теплопроводности для твердого тела (грунта) с приближениями и граничными условиями, в которых учитываются характеристики ВГТО. Известны аналитические решения такой задачи [9, 10], найденные для приближения

постоянного теплового потока ВГТО ($Q = \text{const}$). Также при моделировании нестационарного теплового режима ВГТО могут быть использованы некоторые аналитические решения [11], полученные для устройств замораживания и нагрева грунта и основанные на допущении о постоянстве температуры теплоносителя на входе ($t_1 = \text{const}$). Тем не менее при реальной работе ВГТО Q и t_1 изменяются со временем, как, например, при работе теплонасосной системы теплоснабжения. Следовательно, более точными будут данные моделирования, в которых учитывается переменный характер этих величин, а также других факторов. Для таких расчетов можно использовать численные модели разной сложности, например [12–15], основанные, как правило, на решении уравнения теплопроводности с соответствующими граничными условиями методом конечных разностей либо конечных элементов. В литературе практически отсутствуют результаты экспериментальной проверки достоверности численных моделей нестационарного теплового режима ВГТО. Имеются немногочисленные частные решения такой задачи [16, 17], которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

В настоящей работе предлагается численная модель нестационарного теплового режима ВГТО, позволяющая в отличие от известных аналогов учесть произвольный характер изменения температуры теплоносителя на входе t_1 и массового расхода теплоносителя G . Описываются разработанная установка и результаты экспериментального исследования нестационарной работы макета U-образного грунтового теплообменника при различных условиях эксплуатации.

Численная модель. Разработанная усовершенствованная осесимметричная модель отличается от предложенной ранее в [6] возможностью расчета нестационарного режима ВГТО и распределения температуры в прилегающем грунте. Модель основана на следующих допущениях: теплота в прилегающем грунте распространяется в радиальном направлении, прилегающий к ВГТО массив грунта представляет собой область кольцевой формы, внутренний радиус r_b которой равен радиусу скважины ВГТО, а внешний радиус r_∞ выбирается достаточно большим, чтобы на этой границе не происходило изменения температуры. Таким образом, распределение температуры в этой области описывается уравнением теплопроводности в форме

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \text{ при } 0 < \tau < \infty, r_b < r < r_\infty, \quad (1)$$

где t – температура грунта, °С; τ – время, с; a – температуропроводность грунта, м²/с; r – радиальная координата, м; r_b – радиус скважины, м; r_∞ – координата, соответствующая удаленной от ВГТО области грунта, м.

Особенности работы ВГТО при этом учитываются граничным условием на поверхности скважины

$$\frac{t_b - \bar{t}}{2\pi r_b R_b} = \lambda \left. \frac{\partial t}{\partial r} \right|_{r=r_b} \text{ при } 0 < \tau < \infty, r = r_b, \quad (2)$$

где t_b – средняя температура поверхности скважины, °С; $\bar{t} = 0,5(t_1 + t_2)$ – средняя температура теплоносителя, °С; t_2 – температура теплоносителя на выходе ВГТО, °С; R_b – сопротивление теплопередаче ВГТО, м·К/Вт; λ – теплопроводность грунта, Вт/(м·К).

В (2) параметры ВГТО учитываются в сопротивлении теплопередаче R_b , которое в этом случае принято выражать следующим образом:

$$R_b = H \frac{t_b - \bar{t}}{Q}, \quad (3)$$

где H – длина ВГТО (глубина скважины), м.

Существует несколько методов расчета R_b . Как правило, R_b находят при тепловом расчете ВГТО в стационарном приближении [6–8]. При определении R_b автор использовал данные [6], связывающие температуру теплоносителя на выходе ВГТО t_2 с температурой на входе t_1 и средней температурой поверхности скважины t_b , а соответственно и с тепловым потоком Q . При этом для ВГТО заданных размеров R_b является функцией теплопроводности заполнителя скважины λ_g и материала труб λ_p , коэффициента теплоотдачи в трубах α , массового расхода G и изобарной массовой теплоемкости c_p теплоносителя. В общем случае

$$R_b = f \lambda_g, \lambda_p, \alpha, G, c_p. \quad (4)$$

На удаленной границе r_∞ задается граничное условие первого рода в виде постоянной температуры t_0 , соответствующей начальной средней температуре грунта по длине ВГТО:

$$t = t_0 \text{ при } 0 < \tau < \infty, r = r_\infty. \quad (5)$$

Начальные условия задачи соответствуют постоянной температуре t_0

$$t = t_0 \text{ при } \tau = 0, r_b < r < r_\infty. \quad (6)$$

ВГТО, как правило, располагается на достаточно большой глубине (до ≈ 300 м), при этом температура прилегающего к нему грунта изменяется во времени и по глубине незначительно. Как показывают исследования [18] и практика проектирования [15], эта температура близка к средней годовой температуре поверхности Земли рассматриваемой местности. Следовательно, в качестве начального значения температуры грунта t_0 можно принимать среднюю годовую температуру поверхности Земли, которая будет зависеть от климатических условий площадки размещения ВГТО.

Уравнение (1) с условиями (2)–(6) решается методом конечных разностей. Для подтверждения достоверности разработанной модели проводили эксперимент.

Описание экспериментальной установки. Известны исследования, в которых для подтверждения достоверности численных моделей используются лабораторные установки, содержащие грунтовую засыпку и теплообменные поверхности, имитирующие грунтовые теплообменники [16, 17]. Автор статьи применил аналогичный подход, но с учетом переменных условий на входе ($G \neq \text{const}$; $t_1 \neq \text{const}$).

Экспериментальная установка представлена на рис. 2. В установке источником теплоты является напорная емкость с электронагревателем, которая соединена трубопроводами с горизонтальной U-образной трубкой длиной $H = 950$ мм, расположенной в ящике с песком и имитирующей ВГТО. Материал трубки – пластифицированный поливинилхлорид, наружный диаметр $D = 6$ мм, внутренний $d = 4$ мм, расстояние между ветвями трубки $s = 16$ мм. Теплопроводность материала трубки принимали равной $0,19$ Вт/(м·К) согласно [19].

Постоянство начальной температуры грунта t_0 по всему объему позволяло при исследовании ВГТО в лабораторных условиях располагать их в произвольной ориентации. Исследуемый теплообменник (рис. 2) при вынужденной конвекции теплоносителя имеет горизонтальную ориентацию в пространстве. Адекватность реального ВГТО и экспериментального образца здесь достигалась также за счет конструктивного признака (D , d и $s \ll H$) и условий, соответствующих теплообмену в полуограниченном теле – грунтовом массиве. Последнее достигалось выбором таких размеров песчаной засыпки, при которых в течение эксперимента температура песка на удалении от ВГТО не изменяется.

Для измерения G использовали ротаметр РМ-0,63ГУЗ, t_1 и t_2 измеряли платиновыми термопреобразователями сопротивления (ТСП). Точки установки ТСП для измерения температуры песка (t'_{50} , t''_{50} , t'''_{50} , t_{150}) показаны на рис. 2 маркерами «×». Сигнал от них обрабатывали измерителем «Сосна-003». Погрешность измерения температур не превышала 1 %, массового расхода – 5 %, теплового потока – 7 %. Результатами эксперимента являлись измеренные G , t_1 , t_2 , t'_{50} , t''_{50} , t'''_{50} и t_{150} .

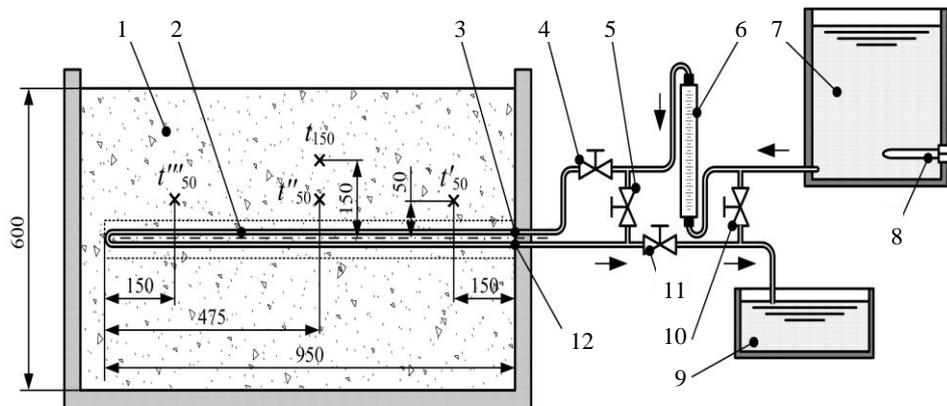


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – грунтовая засыпка (песок); 2 – U-образная трубка (макет ВГТО); 3, 12 – датчики температур теплоносителя на входе и выходе U-образной трубки соответственно; 4, 5, 10, 11 – вентили; 6 – ротаметр; 7 – напорная емкость; 8 – электронагреватель; 9 – сборник воды; × – точки измерения температуры грунта

Установка работала следующим образом. При открытых вентилех 4 и 11 горячий теплоноситель самотеком из напорной емкости двигался по соединительным трубопроводам, поступал в U-образную трубку при температуре $t_1 = 50\text{--}80$ °С и далее, охлаждаясь до температуры t_2 , в сборник воды. Требуемые значения температуры теплоносителя на входе t_1 дости-

гались изменением мощности электронагревателя. Также с помощью вентиля регулировали массовый расход теплоносителя G .

Определение теплофизических характеристик песка. Для получения теоретических изменений параметров работы исследуемого макета грунтового теплообменника по предложенной модели необходимо знать теплофизические характеристики содержащегося в ней песка, а именно теплопроводность λ и температуропроводность a . В настоящем исследовании λ образца песка лабораторной установки определяли на приборе NFM 436 Lambda, который реализует метод плоского слоя в соответствии с СТБ 1618–2006 [20]. При этом полученное значение λ составило 0,393 Вт/(м·К) с погрешностью не более 3 % ($\pm 0,012$ Вт/(м·К)). Такой метод также успешно применен при исследовании теплопроводности сыпучих материалов – загрязнителей аппаратов воздушного охлаждения, в том числе и песка лабораторной установки [21].

Для определения температуропроводности a в исследовании применен метод регулярного теплового режима (метод a -калориметра), разработанный Г. М. Кондратьевым [22]. Исследование проводили с использованием цилиндрического тонкостенного a -калориметра и водяного термостата с мешалкой. Получено значение температуропроводности $a = 3,496 \cdot 10^{-7}$ м²/с с границами доверительного интервала $\pm 0,118 \cdot 10^{-7}$ м²/с.

Теплофизические характеристики λ и a использовали далее в расчетах по предложенной модели.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных. Для условий эксперимента проводили численные расчеты по разработанной модели. При этом задача заключалась в расчете температуры теплоносителя на выходе t_2 и теплового потока Q макета теплообменника при изменении температуры теплоносителя на входе t_1 и массового расхода G , полученных в результате эксперимента. Также в результате расчета получали распределение средней температуры грунта по r (расстояние от ВГТО). Разработанная численная модель позволила получить распределение температуры в некотором усредненном сечении прилегающей к ВГТО области грунта. При сравнении расчетных и экспериментальных данных считается, что расчетная температура грунта t_{50p} при $r = 50$ мм соответствует средней экспериментальной температуре грунта $t_{50э}$ на расстоянии 50 мм от оси U-образной трубки, то есть

$$t_{50э} = \frac{t'_{50} + t''_{50} + t'''_{50}}{3}. \quad (7)$$

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных показаны на рис. 3 и 4. Экспериментальные точки на графиках отмечены маркерами, а расчетные результаты – в виде линий. Проанализированы результаты четырех экспериментов, отличающихся средней начальной температурой грунта t_0 и характером изменения t_1 и G .

Результаты на рис. 3а и 3б соответствуют эксперименту, в котором после нагрева до температуры ≈ 60 °С теплоноситель подавали по соединительным трубопроводам к макету грунтового теплообменника 2 (рис. 2). В начальный период времени ($\tau < 0,3$ ч) происходил рост температуры

теплоносителя на входе t_1 от ≈ 20 до ≈ 57 °С. Такой переходный процесс обусловлен тем, что в начале эксперимента соединяющие трубопроводы и арматура находились при температуре ≈ 20 °С, и часть теплоты теплоносителя в начале эксперимента расходовалась на разогрев стенок трубопровода.

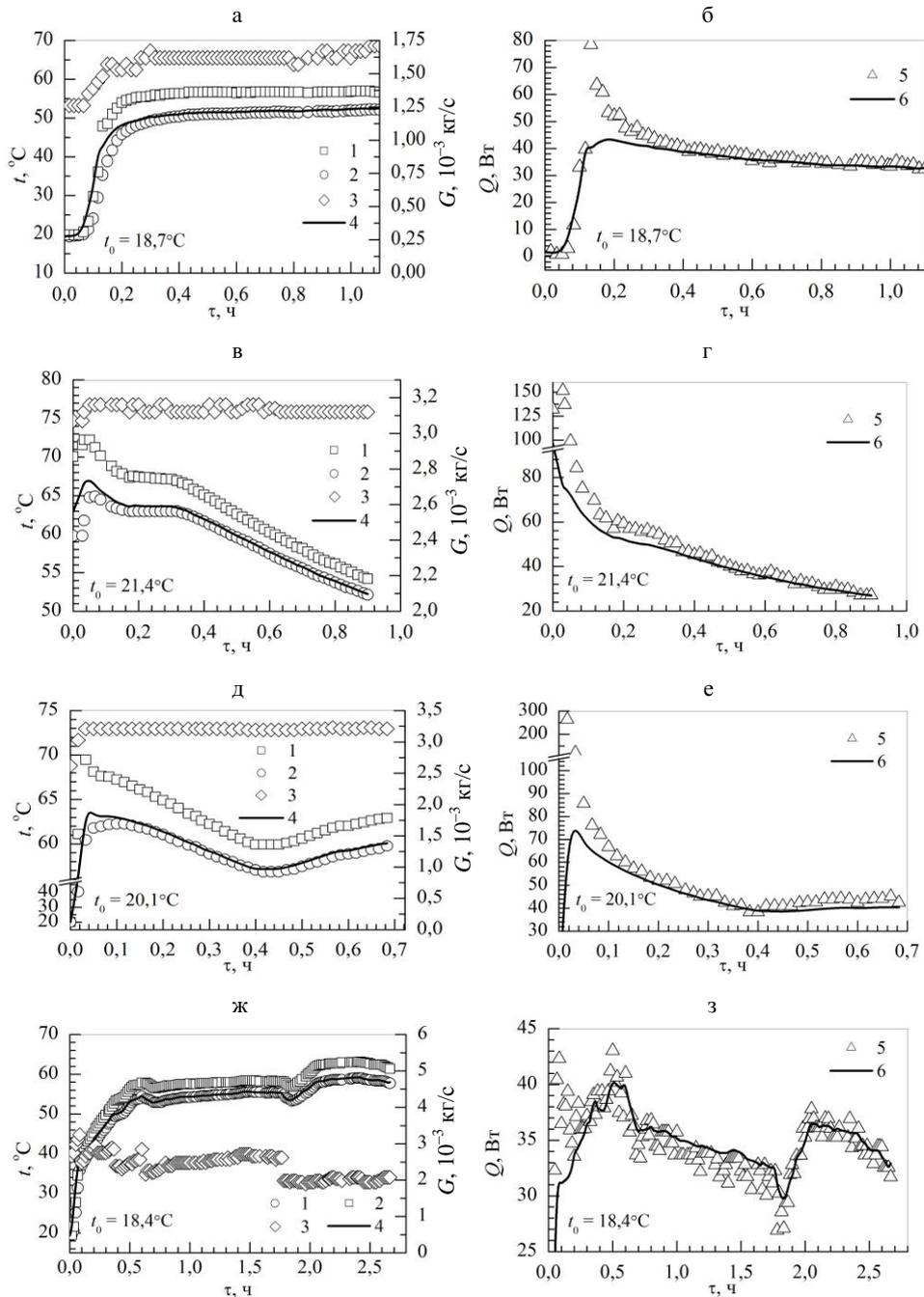


Рис. 3. Изменение температуры и расхода теплоносителя (а, в, д, ж), теплового потока (б, г, е, и), макета ВГТО при различных начальных температурах грунта t_0 :
 1, 2, 3, 5 – экспериментальные значения t_1 , t_1 , G и Q соответственно;
 4, 6 – расчетные значения t_2 и Q

На начальном этапе эксперимента также наблюдали изменение G от $1,26 \cdot 10^{-3}$ до $1,61 \cdot 10^{-3}$ кг/с, что связано с изменением зависящих от температуры свойств теплоносителя, а соответственно и потерь давления в соединяющих трубопроводах и грунтовом теплообменнике. На протяжении основной части анализируемого периода ($0,3 > \tau > 1,1$ ч) поддерживались постоянными $t_1 \approx 57$ °С и $G \approx 1,61 \cdot 10^{-3}$ кг/с. При таком характере изменения t_1 и G в начале эксперимента ($0 > \tau > 0,16$ ч) происходил скачок Q до 80 Вт, что обусловлено резким ростом t_1 , а соответственно и температурного напора грунтового теплообменника. Далее происходило плавное снижение Q до 30 Вт при $\tau = 1,1$ ч, что объясняется ростом температуры прилегающего грунта, а соответственно и уменьшением температурного напора в грунтовом теплообменнике.

Результаты на рис. 3в и 3г соответствуют эксперименту, в котором после нагрева до температуры ≈ 75 °С теплоноситель подавали по соединительным трубопроводам к макету грунтового теплообменника 2 (рис. 2). Здесь поддерживали постоянный $G \approx 3,12 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Увеличение G по сравнению с ранее рассмотренным экспериментом приводило к тому, что время разогрева соединительных трубопроводов существенно уменьшалось, и t_1 достигала максимума (≈ 72 °С) уже при $\tau = 0,04$ ч. Далее в эксперименте электронагреватель 8 (рис. 2) выключали, а подпитку напорной емкости осуществляли холодной водой. Это приводило к снижению температуры теплоносителя на входе грунтового теплообменника с $t_1 = 72$ °С при $\tau = 0,04$ ч до $t_1 = 54$ °С при $\tau = 0,90$ ч в конце эксперимента. При таком характере изменения t_1 и G в течение всего эксперимента происходило плавное снижение теплового потока Q со 150 Вт при $\tau = 0,04$ ч до 30 Вт при $\tau = 0,90$ ч в конце эксперимента. Максимальное значение Q соответствовало минимальной температуре песка и максимальной t_1 , а соответственно и максимальному температурному напору в грунтовом теплообменнике. С течением времени песок нагревался, а t_1 падала, что выражалось в уменьшении температурного напора грунтового теплообменника и закономерном снижении Q .

Результаты на рис. 3д и 3е соответствуют эксперименту, в котором после нагрева до температуры ≈ 74 °С теплоноситель подавали по соединительным трубопроводам к макету грунтового теплообменника 2 (рис. 2). Здесь поддерживали постоянный $G \approx 3,21 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Большой G также приводил к уменьшению времени разогрева подводящих линий, и t_1 достигала максимума (≈ 70 °С) при $\tau = 0,04$ ч. Далее на участке $0 > \tau > 0,4$ ч электронагреватель 8 (рис. 2) выключали, а подпитку напорной емкости осуществляли холодной водой. Это приводило к снижению t_1 с 70 °С при $\tau = 0,04$ ч до 60 °С при $\tau = 0,40$ ч. При этом из-за снижения температурного напора грунтового теплообменника, вызванного ростом температуры грунта и уменьшением t_1 , происходило падение Q с 300 Вт при $\tau = 0$ до 40 Вт при $\tau = 0,4$ ч. На участке $0,4 > \tau > 0,7$ ч электронагреватель включали, нагрев теплоносителя возобновляли, что приводило к росту t_1 с 60 °С при $\tau = 0,4$ ч до 63 °С при $\tau = 0,7$ ч. Такое увеличение t_1 позволяло при повышении температуры песка поддерживать практически постоянный температурный напор грунтового теплообменника, а соответственно и практически постоянный $Q = 40\text{--}48$ Вт.

Результаты на рис. 3ж и 3з соответствуют эксперименту, в котором подачу теплоносителя к грунтовому теплообменнику начинали одновременно с включением электронагревателя, то есть без предварительного нагрева в напорной емкости 7 (рис. 2). Это приводило к более продолжительному ($0 > \tau > 0,6$ ч) росту температуры t_1 с 20 до 60 °С, G на этом начальном участке также изменялся от $2,0 \cdot 10^{-3}$ до $3,5 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Начальный участок сопровождался ростом теплового потока Q с 32 до 43 Вт, что вызвано ростом температурного напора грунтового теплообменника за счет увеличения t_1 . Следующий этап эксперимента ($0,6 > \tau > 1,8$ ч) характеризовался относительным постоянством температуры $t_1 = 56\text{--}60$ °С и плавным увеличением G от $2,0 \cdot 10^{-3}$ до $2,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с, что сопровождалось падением Q с 45 до 27 Вт, объясняемого снижением температурного напора грунтового теплообменника из-за роста температуры песка. Далее на этапе эксперимента $1,8 > \tau > 2,1$ ч происходил рост t_1 с 60 до 64 °С, расход G при этом снижался и оставался равным $2,0 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Здесь рост t_1 приводил к увеличению Q до 38 Вт благодаря повышению температурного напора. На завершающем этапе эксперимента ($2,1 > \tau > 2,7$ ч) температуру t_1 поддерживали практически постоянной (≈ 64 °С), как и массовый расход $G = 2,0 \cdot 10^{-3}$ кг/с. В этом случае происходило закономерное снижение Q до 31 Вт из-за уменьшения температурного напора, вызванного ростом температуры песка.

Качественный характер изменения температуры грунта был аналогичен для всех проведенных экспериментов, а именно происходил плавный рост локальных температур t'_{50} , t''_{50} , t'''_{50} , t_{150} в соответствии с расположением датчиков (рис. 2) и со средней температурой грунта t_{50} . Это характерно и для расчетных данных. В качестве примера изменение локальных и средней температур грунта при $t_0 = 20,1$ °С представлено на рис. 4.

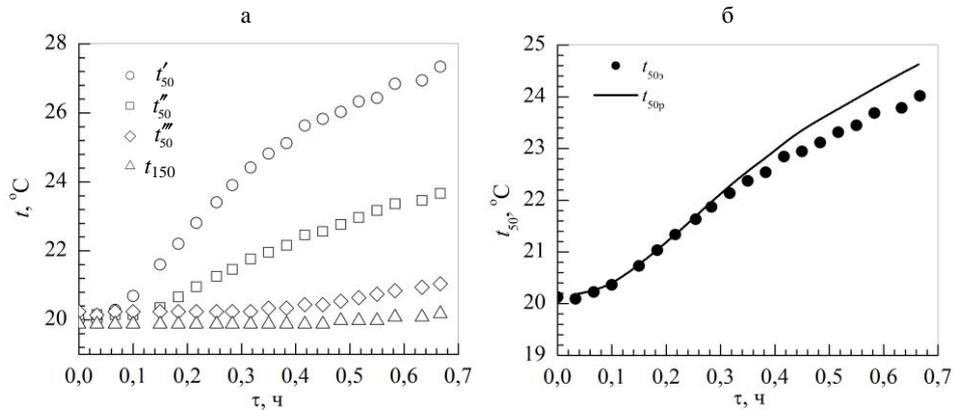


Рис. 4. Изменение локальных (а) и средней (б) температуры грунта при $t_0 = 20,1$ °С

Из рисунков видно, что расчетные и экспериментальные данные согласуются удовлетворительно. В рамках настоящей работы отклонение расчетных данных от экспериментальных для t_2 оценивали средней относительной ошибкой

$$A_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|t_{2,i}^p - t_{2,i}|}{t_{2,i}} \cdot 100 \%, \quad (8)$$

где n – количество экспериментальных точек; $t_{2,i}^p$ – расчетное значение t_2 , соответствующее i -й экспериментальной точке, °С; $t_{2,i}$ – экспериментальное значение t_2 в i -й экспериментальной точке, °С.

Аналогично определяли A_Q и A_{50} для Q и t_{50} соответственно. Для представленных экспериментальных данных ошибки изменялись в диапазонах: $A_h = 0,5–1,8 \%$; $A_{50} = 1,0–2,3 \%$; $A_Q = 3,6–5,4 \%$. Отклонения расчетных величин от экспериментальных данных вызвано как случайной погрешностью измерения величин, так и систематической погрешностью, вносимой допущениями модели, а также погрешностью определения a и λ .

ВЫВОДЫ

1. Разработана приближенная модель нестационарного теплового режима вертикальных грунтовых теплообменников, отличающаяся от аналогов тем, что учитывает произвольный характер изменения массового расхода и температуры теплоносителя на входе и позволяет получить радиальное распределение средней по высоте вертикального грунтового теплообменника температуры в прилегающем грунте.

2. Разработана установка и получены экспериментальные данные, с которыми удовлетворительно согласуются численные результаты по представленной модели для макета U-образного грунтового теплообменника с относительным шагом и диаметром трубы соответственно $s/L = 0,017$ и $D/L = 0,006$, расположенного в сухом песке со средней теплопроводностью $0,393$ Вт/(м·К) и температуропроводностью $3,496 \cdot 10^{-7}$ м²/с в диапазоне изменения температуры теплоносителя $20–70$ °С.

3. Разработанная численная модель может быть использована при проектировании и оценке эффективности вертикальных грунтовых теплообменников, работающих в составе различных установок, в том числе с тепловыми насосами систем теплоснабжения на основе использования низкопотенциальной теплоты грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. В а с и л ь е в, Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием тепловой энергии поверхностных слоев Земли / Г. П. Васильев. – М.: Издат. дом «Граница», 2006. – 176 с.
2. Д у б о в и к, О. В. Геотермальные тепловые насосы. Характеристика и расчет грунтового теплообменника / О. В. Дубовик, С. В. Конев, Н. С. Конева // Тепло- и массоперенос-2012: сб. науч. трудов. – Минск: ИТМО имени А. В. Лыкова, 2013. – С. 30–34.
3. Н а к о р ч е в с к и й, А. И. Особенности переходных процессов при грунтовом аккумулировании солнечной энергии / А. И. Накорчевский // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 2. – С. 156–160.
4. Ф и л а т о в, С. О. Эффективность использования энергетических свай с теплоносителем воздух в системах вентиляции и теплоснабжения / С. О. Филатов, В. И. Володин // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 3. – С. 44–50.
5. М а т е м а т и ч е с к а я модель грунтового теплообменника для систем вентиляции /

- И. П. Витязь [и др.] // Тепломассообмен ММФ-2000: труды IV Междунар. форума по тепломассообмену. – 2000. – Т. 10. – С. 115–122.
6. Ф и л а т о в, С. О. Тепловой расчет вертикальных грунтовых теплообменников / С. О. Филатов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2013. – № 4. – С. 81–90.
7. A l - K h o u r y, R. Efficient Finite Element Formulation for Geothermal Heating Systems. Part I: Steady State / R. Al-Khoury, P. G. Bonnier, R. B. J. Brinkgreve // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2005. – Vol. 63, Iss. 7. – P. 988–1013.
8. L a m a r c h e, L. A Review of Methods to Evaluate Borehole Thermal Resistances in Geothermal Heat-Pump Systems / L. A. Lamarche, S. Kajl, B. Beauchamp // Geothermics. – 2010. – Vol. 39, Iss. 2. – P. 187–200.
9. E s k i l s o n, P. Thermal Analysis Heat Extraction Boreholes: Ph. D. Thesis / P. Eskilson. – Lund, 1987. – 264 p.
10. G e h l i n, S. Thermal Response Test – in Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock. Licentiate Thesis / S. Gehlin. – Lulea: Lulea University of Technology, 1998. – 23 p.
11. В а с и л ь е в, Л. Л. Замораживание и нагрев грунта с помощью охлаждающих устройств / Л. Л. Васильев, С. Л. Вааз; под ред. Л. И. Калыхана. – Минск: Наука и техника, 1986. – 192 с.
12. A l - K h o u r y, R. Efficient Finite Element Formulation for Geothermal Heating Systems. Part II: Transient / R. Al-Khoury, P. G. Bonnier // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2006. – Vol. 67, Iss. 5. – P. 725–745.
13. H a n u s z k i e w i c z - D r a p a l a, M. Heating System with Vapour Compressor Heat Pump and Vertical U-tube Ground Heat Exchanger / M. Hanuszkiewicz-Drapala, J. Skladzien // Archives of Thermodynamics. – 2010. – Vol. 31, No 4. – P. 93–100.
14. B a u e r, D. Zur Thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern: Dissertation ... Doktoringenieur / D. Bauer. – Stuttgart: Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, 2011. – 136 p.
15. H u b e r, A. Berechnungsmodul für Erdwärmesonden / A. Huber, O. Schuler. – Zürich: Bundes-Amt für Energiewirtschaft, 1997. – 74 p.
16. B e i e r, R. A. Reference Data Sets for Vertical Borehole Heat Exchanger Models and Thermal Response Test Analysis / R. A. Beier, M. D. Smith, J. D. Spittler // Geothermics. – 2011. – Vol. 40, No 1. – P. 79–85.
17. Н а к о р ч е в с к и й, А. И. Экспериментальная проверка достоверности математических моделей грунтового аккумулирования теплоты / А. И. Накорчевский, А. Н. Недбайло, Б. И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2. – С. 51–61.
18. K a s u d a, T. Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States / T. Kasuda, P. R. Archenbach // ASHRAE Transactions. – 1965. – Vol. 71, No 1. – P. 61–75.
19. Н о в и ч е н о к, Л. Н. Теплофизические свойства полимеров / Л. Н. Новиченок, З. П. Шульман; под ред. А. Г. Шашкова. – Минск: Наука и техника, 1971. – 120 с.
20. М а т е р и а л ы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности при стационарном тепловом режиме: СТБ 1618–2006. – Введ. 2006.07.01. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. – 16 с.
21. Исследование теплопроводности внешних загрязнителей теплообменных секций аппаратов воздушного охлаждения / А. Б. Кунтыш [и др.] // Химическая техника. – 2013. – № 11. – С. 35–38.
22. К о н д р а т ь е в, Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев. – М.: Госуд. изд-во технико-теорет. литер., 1954. – 408 с.

REFERENCES

1. V a s i l y e v, G. P. (2006) *Heat & Cold Supply of Buildings and Installations Using Heat Energy of Earth Surface Layer*. Moscow, Publishing House “Graniza”. 176 p. (in Russian).
2. D u b o v i k, O. V., Konev, S. V., & Koneva, N. S. (2013) Geothermal Heat Pumps. Characteristics and Design of Ground Heat Exchanger. *Teplo- i Massoperenos-2012. Sbornik Nauchnykh Trudov* [Heat-and-Mass Transfer-2012. Collection of Scientific Papers]. Minsk, A. V. Luikov Heat & Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 30–34 (in Russian).
3. N a k o r c h e v s k y, A. I. (2006) Peculiarities of Transfer Processes in Ground Solar

Energy Storage. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Engineering-Physical Journal], 79 (2), 156–160 (in Russian).

4. Filatov, S. O., & Volodin, V. I. (2013) Efficiency Usage of Energy Piles with Air-Heat Interchanger in Ventilation and Heat Supply Systems. *Promyshlennaya Teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 35 (3), 44–50 (in Russian).

5. Vit'ya z, I. P., Danilevsky, L. N., Kabashnikov, V. P., & Nekrasov, V. P. (2000) Mathematical Model of Ground Heat Exchanger for Ventilation System. *Teplomassoobmen MMF-2000. Trudy IV Mezhdunar. Foruma po Teplomassoobmenu* [Heat & Mass Exchange of Mechanical and Mathematical Faculty-2000. Proceedings of the IV International Heat & Mass Exchange Forum], Vol. 10, 115–122 (in Russian).

6. Filatov, S. O. (2013) Heat Analysis of Borehole Ground Heat Exchanger. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'Edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 4, 81–90 (in Russian).

7. Al-Khoury, R., Bonnier, P. G., & Brinkgreve, R. B. J. (2005) Efficient Finite Element Formulation for Geothermal Heating Systems. Part I: Steady State. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 63 (7), 988–1013 (doi: 10.1002/nme.1313).

8. Lamarche, L. A., Kaji, S., & Beauchamp, B. (2010) A Review of Methods to Evaluate Borehole Thermal Resistances in Geothermal Heat-Pump Systems. *Geothermics*, 39 (2), 187–200 (doi: 10.1016/j.geothermics.2010.03.003).

9. Eskilson, P. (1987) Thermal Analysis Heat Extraction Boreholes. Lund. 264 p.

10. Gehlin, S. (1998) Thermal Response Test – in Situ Measurements of Thermal Properties in Hard Rock. Licentiate Thesis. Lulea: Lulea University of Technology. 23 p.

11. Vasilyev, L. L., Vaas, S. L., & Kalukhan, L. I. (1986) *Ground Freezing and Heating with a Help of Cooling Devices*. Minsk, Science & Engineering. 192 p. (in Russian).

12. Al-Khoury, R., & Bonnier, P., G. (2006) Efficient Finite Element Formulation for Geothermal Heating Systems. Part II: Transient. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 67 (5), 725–745 (doi: 10.1002/nme.1662).

13. Hanuszkiwicz-Drapala, M., & Skladzien, J. (2010) Heating System with Vapour Compressor Heat Pump and Vertical U-tube Ground Heat Exchanger. *Archives of Thermodynamics*, 31 (4), 93–110.

14. Bauer, D. (2011) Zur Thermischen Modellierung von Erdwärmesonden und Erdsonden-Wärmespeichern: Dissertation ... Doktoringenieur. Stuttgart: Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart. 136 p. (German).

15. Huber, A., & Schuler, O. (1997) Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Zürich: Bundes-Amt für Energiewirtschaft. 74 p. (German).

16. Beier, R. A., Smith, M. D., & Spitler, J. D. (2011) Reference Data Sets for Vertical Borehole Heat Exchanger Models and Thermal Response Test Analysis. *Geothermics*, 40 (1), 79–85 (doi: 10.1016/j.geothermics.2010.12.007).

17. Nakorchevskiy, A. I., Nedebailo, A. N., & Basok, B. I. (2006) Experimental Checking of Mathematical Models Validity of Ground Heat Storage. *Promyshlennaya Teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 28 (2), 51–61 (in Russian).

18. Kasuda, T., & Archenbach, P. R. (1965) Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. *ASHRAE Transactions*, 71 (1), 61–75.

19. Novichenok, L. N., Shulman, Z. P., Shashkov, A. G. (1971) *Heat & Physical Qualities of Polymers*. Minsk, Science and Engineering. 120 p. (in Russian).

20. Standards of the Republic of Belarus 1618–2006. Materials and Building Products. Method of Heat Conductivity Determination in Steady Regime. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2006. 16 p. (in Russian).

21. Kuntys, A. B., Sukhotsky, A. B., Filatov, S. O., & Zhdanovich, A. Iu. (2013) Investigation of External Pollutions of Heat Exchange Units of Air-Cooling Devices. *Khimicheskaya Tekhnika* [Chemical Engineering], 11, 35–38 (in Russian).

22. Kondratyev, G. M. (1954) *Regular Heat Regime*. Moscow, State Publishing House of Technical and Theoretical Literature. 408 p. (in Russian).

Представлена кафедрой энергосбережения,
гидравлики и теплотехники

Поступила 17.03.2014