

УДК 536.25

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В МОРОЗИЛЬНОЙ КАМЕРЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Красношлыков А.С., Максимов В.И.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, e-mail: krasnas@tpu.ru*

В статье рассмотрено экспериментальное исследование полей температур в объемах воздуха и воды, находящихся в морозильной камере, при различных режимах работы холодильной установки. Получены зависимости распределения температуры в объеме воды и воздуха в зависимости от условий работы установки. Выявлено, что поля температур меняются в зависимости от возникающих в исследуемой области конвективных течений в морозильной камере и замораживаемого жидкого продукта. Установлено что при работе холодильной установки в различных режимах формируется существенно неоднородное температурное поле в морозильной камере. Данная неоднородность обусловлена различной интенсивностью конвективных течений воздуха и охлаждаемой жидкости в исследуемой камере. Полученные в ходе экспериментальных исследований закономерности хорошо согласуются с данными математического моделирования процессов теплообмена в аналогичных морозильных камерах.

Ключевые слова: теплонасосная установка, вынужденная конвекция, тепловые режимы водоемов, теплообменник-испаритель

EXPERIMENTAL STUDY OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN THE FREEZER REFRIGERATION UNIT

Krasnoshlykov A.S., Maksimov V.I.

National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, e-mail: krasnas@tpu.ru

In the article examined an experimental study pour on temperatures in the volumes of air and water in the freezer, with different regimes of the work of cooling installation. Are obtained the dependences of the temperature distribution in volume of water and air depending on the conditions for the work of installation. It is revealed, that the temperature fields change depending on the appearing in the region being investigated convective flows in the freezer and the frozen liquid product. With the work of cooling installation in different regimes is established that formed substantially heterogeneous temperature field in freezer. This heterogeneity is caused by different intensity of the convective air flows and cooled liquid in the camera being investigated. The regularities obtained in the course of experimental studies are agree well with the data of the mathematical simulation of the processes of heat exchange in the analogous freezers.

Keywords: heat pump system, forced convection, thermal regimes of reservoirs, heat exchanger-evaporator

В настоящее время многие промышленные теплообменные установки малоэффективны. Основой их проектирования являются модели на базе балансных уравнений, а процессы конвективного теплообмена не учитываются [6]. С ростом требований к энергосбережению и ресурсоэффективности промышленных предприятий возрастает интерес к точности прогноза тепловых режимов и, соответственно, учету влияния конвективных течений в теплообменных установках [2–4].

Несмотря на большое число работ [1, 5], посвященных теории конвективного теплообмена и его применения, многие задачи исследованы еще далеко не достаточно. Поэтому развитие теории конвективных течений в теплообменных установках представляет несомненный теоретический и практический интерес.

Целью данной работы является экспериментальное определение значений темпе-

ратур в морозильной камере холодильной установки в условиях естественной конвекции при различной тепловой нагрузке.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой теплообменник с морозильной камерой (рис. 1), компрессором и конденсатором, предназначенным для отдачи тепла от рабочего тела теплообменника в окружающую среду без принудительного охлаждения.

Установка также включает фильтр-осушитель, препятствующий попаданию загрязнений в испаритель. Обязательным элементом теплообменника является капиллярная трубка, предназначенная для дросселирования рабочего тела установки и создания перепада давления внутри системы. Испаритель находится непосредственно в морозильной камере. Также система снабжена манометрами для

регистрации давления в конденсаторе и испарителе. В морозильной камере и на двигателе компрессора установлены тепловые реле. Холодильная установка может выводиться из работы в двух случаях:

1. Температура в морозильной камере достигает предельно допустимого значения ($-15...-25^{\circ}\text{C}$);

2. Происходит перегрев двигателя компрессора до температур $\sim 90^{\circ}\text{C}$.

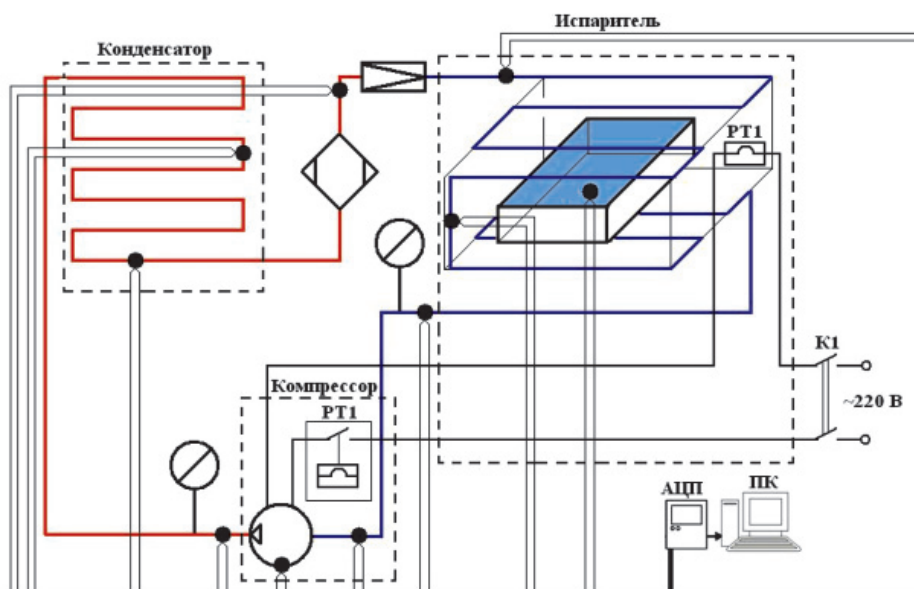


Рис. 1. Схематическое изображение лабораторной установки

Первый вариант является более частым и считается нормальным режимом работы, так как отключения по температуре в морозильной камере являются энергосберегающим мероприятием. Отключения при перегреве двигателя компрессора являются следствием нарушений в работе холодильной установки, которые могут быть вызваны несколькими причинами. Основной можно считать недопустимую тепловую нагрузку в морозильной камере, что приводит к продолжительной работе компрес-

сора без отключений. Кроме того, перегрев компрессора может быть вызван отсутствием фреона в системе при ее разгерметизации или нарушением целостности электрической изоляции обмоток двигателя.

Рабочим телом теплообменника является хладагент R-134A.

Эксперимент проводился с морозильной камерой холодильной установки (рис. 2) ($0,5 \times 0,35 \times 0,25$ м), в которой располагалась емкость с водой ($0,3 \times 0,24 \times 0,1$ м).

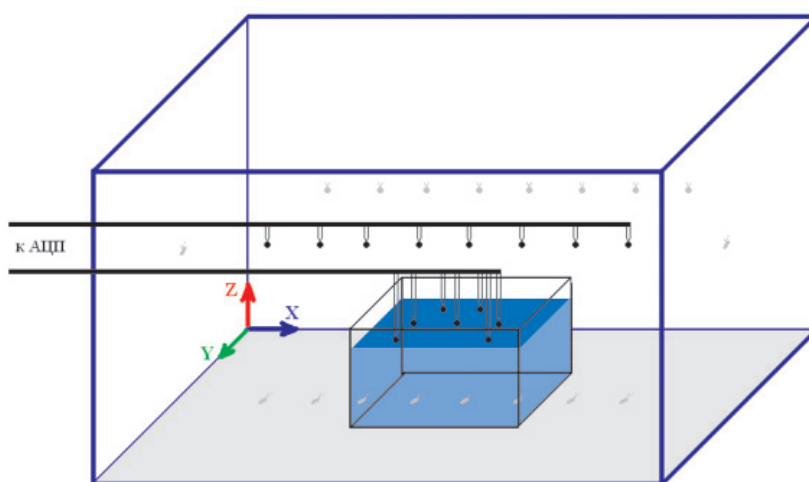
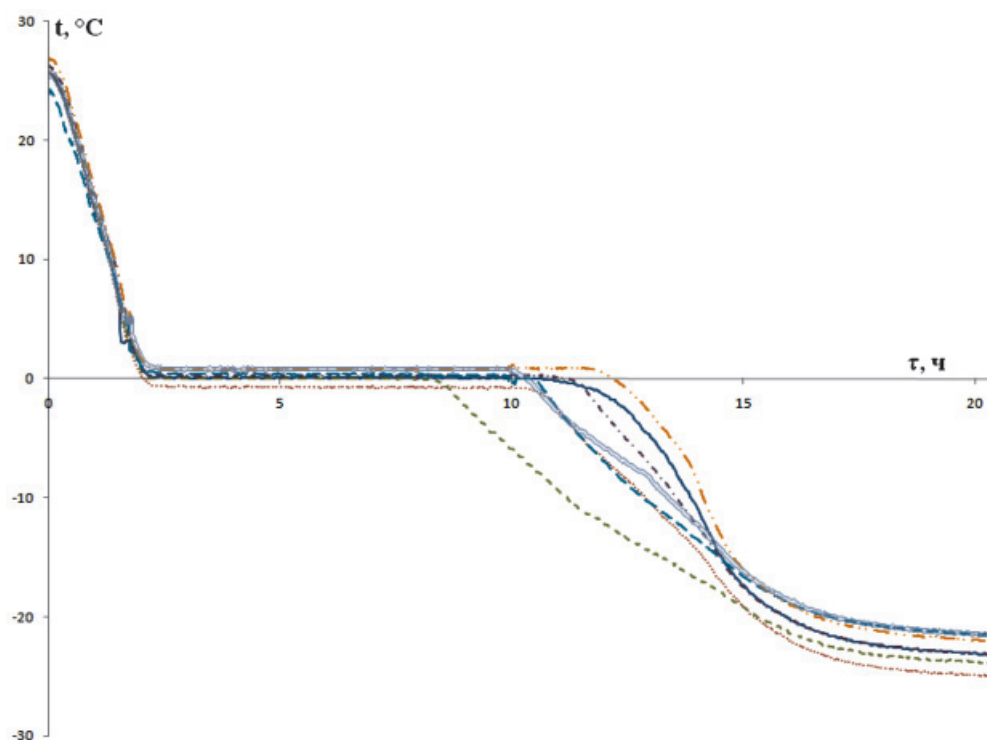
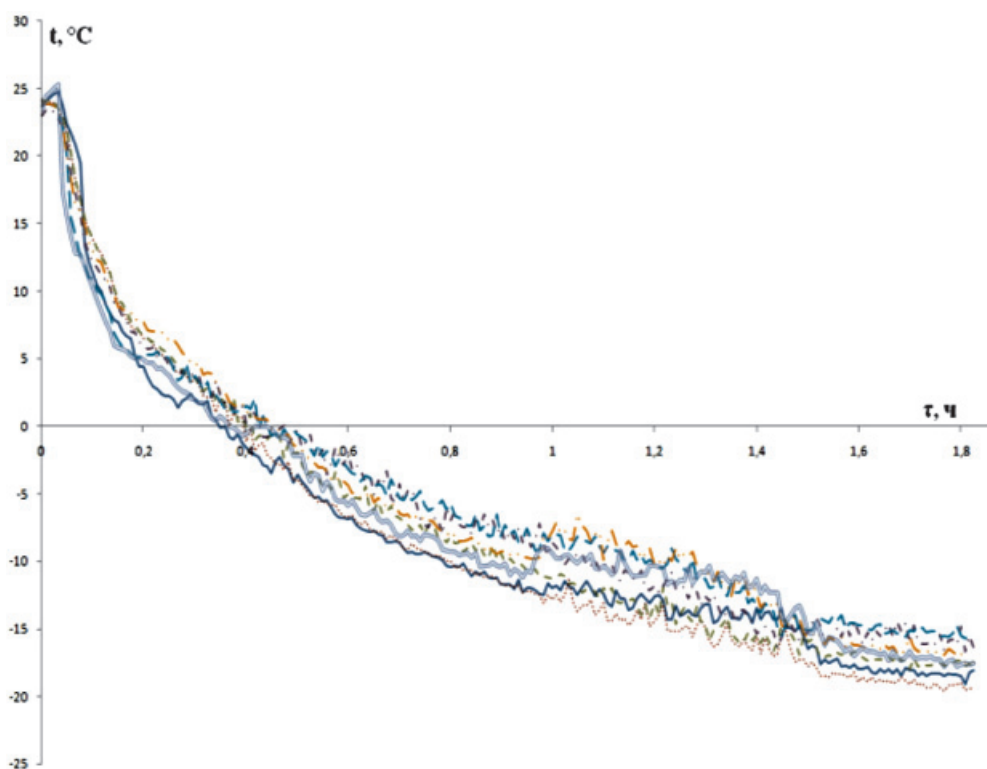


Рис. 2. Схематическое изображение исследуемой области

На рис. 3 представлены графические зависимости температуры воды и воздуха от времени (емкость располагалась в морозильной камере при запуске).



а



б

Рис. 3. Изменение температуры воды (а) и воздуха (б) в зависимости от времени работы установки:

— 1 термопара; - - - 2 термопара; — — — 3 термопара; — — — 4 термопара;
 - - - 5 термопара; · · · 6 термопара; — — — 7 термопара

Проводя анализ полученных значений температур для различных режимов работы установки, можно сделать вывод о том, что конвективные течения, возникающие в исследуемой области, оказывают влияние на поле температур замораживаемого жидкого продукта. Также следует отметить, что условия работы незначительно влияют на время протекания фазового перехода. Так, при более экономичном режиме (емкость располагалась в морозильной камере при запуске) вода замораживалась быстрее. При размещении емкости в морозильной камере в момент выхода установки на стационарный режим процесс фазового перехода жидкости осуществлялся быстрее в области нижней границы емкости, которая уста-

навливалась на охлажденную испарителем подложку. Последнее приводило к интенсификации процесса теплопередачи между жидкостью и воздухом в камере.

Полученные данные могут быть использованы для определения оптимального режима работы холодильных установок при различных тепловых нагрузках.

Проведено математическое моделирование исследовавшегося экспериментального процесса. Область решения задачи – замкнутая прямоугольная область со стенками конечной толщины (рис. 4). На границах заданы граничные условия второго рода. Использовался пакет COMSOL Multiphysics. На рис. 5 приведены типичные результаты численного моделирования исследовавшихся процессов.

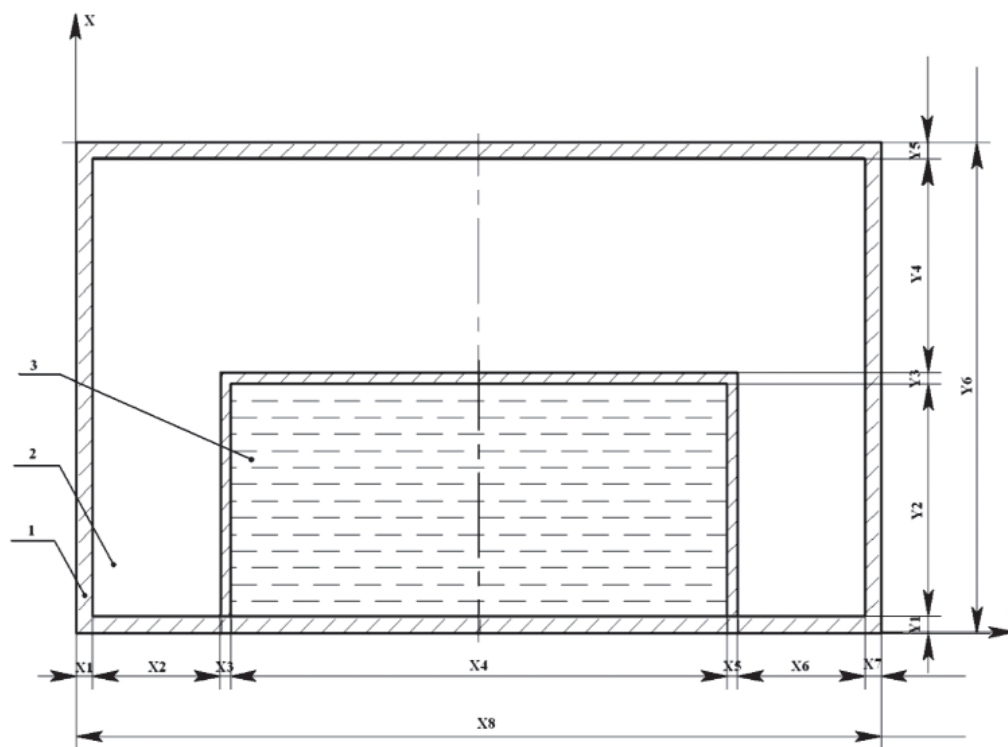


Рис. 4. Область решения задачи:
1 – стенки камеры, 2 – воздух, 3 – вода

Проведен сравнительный анализ результатов экспериментального исследования конвективных течений в морозильной камере и значений температур, полученных при решении задачи конвективного теплообмена в прямоугольной области (рис. 6). Результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

На основании анализа и обобщения полученных результатов можно сделать вывод, что при работе холодильной установки

формируется существенно неоднородное температурное поле в морозильной камере. Данная неоднородность обусловлена интенсивными конвективными течениями воздуха и охлаждаемой жидкости в исследуемой камере.

Относительная погрешность результатов экспериментального исследования не превышала 4%. Максимальное отклонение результатов математического моделирования и экспериментов составило менее 5%.

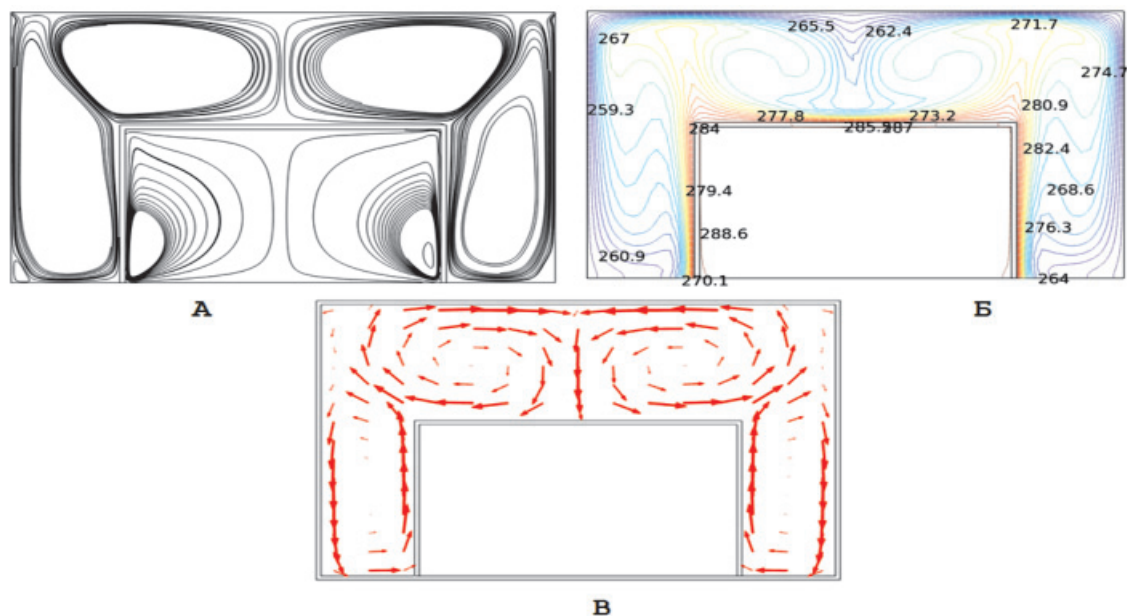


Рис. 5. Изолинии функции тока (А), поле температур (Б), векторы движения воздушных масс в исследуемой области (В)

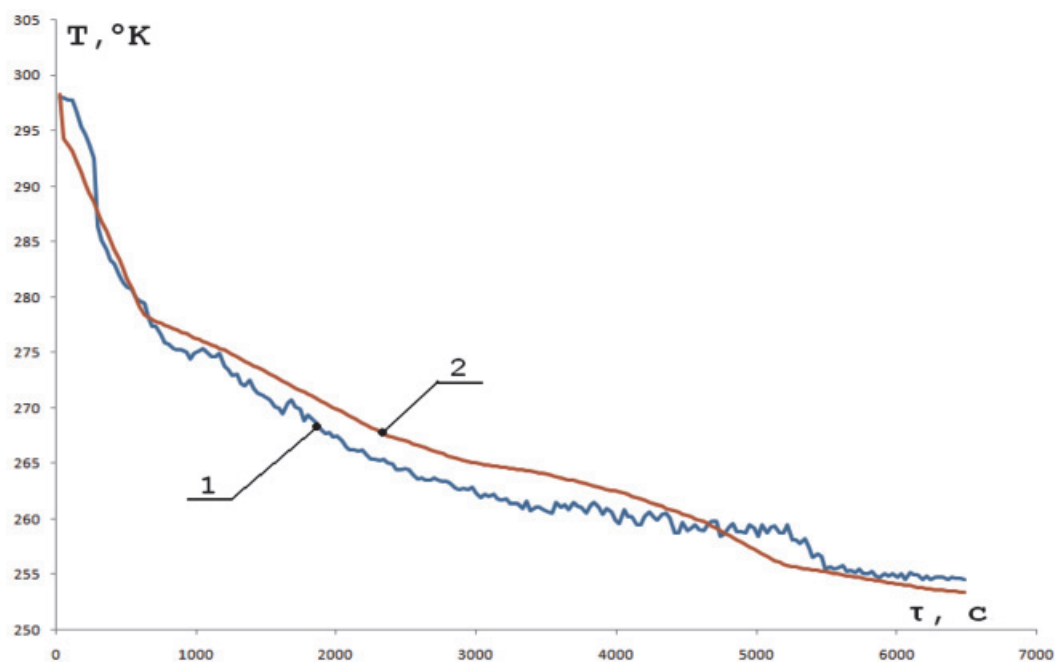


Рис. 6. Зависимости температур от времени: экспериментальные данные (кривая 1), результаты математического моделирования (кривая 2)

Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» (Шифр федеральной целевой научно-технической программы 2.1321.2014).

Список литературы

1. Елистратов С.Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов: дис. ... д-ра техн. наук – Новосибирск. 2010. – 383 с.

2. Красношлыков А.С., Максимов В.И. Экспериментальное исследование влияния конвективных течений в морозильной камере холодильных установок на скорость заморозки продуктов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 3 (22). – С. 7–11.

3. Кузнецов Г.В., Шермет М.А. Сопряженная естественная конвекция в замкнутой области при наличии тепловыделяющего элемента с постоянной интенсивностью тепловыделения // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – № 5 (303). – С. 95–110.

4. Максимов В.И., Нагорнов Д.А., Ударцев Е.И. Экспериментальное исследование естественной и смешанной конвекции в прямоугольной области с локальным источником нагрева // Химическая физика и актуальные проблемы энергетики: сборник тезисов и статей Всерос. молод. конф. (Томск, 4–6 сент. 2012 г.). – Томск, 2012. – С. 179–182.

5. Перспективы применения ТН при утилизации теплоты городских стоков / Слесаренко В.В., Князев В.В., Вагнер В.В., Слесаренко И.В. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – № 3. – С. 28–33.

6. Сергеев Н.Н. Теоретические аспекты энергосбережения и повышения энергетической эффективности промышленных предприятий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Экономика. – 2013. № 1. – С. 29–36.

References

1. Elistratov S.L. Kompleksnoe issledovanie jeffektivnosti teplovyh nasosov: dis. ... d-ra tehn. nauk Novosibirsk. 2010. 383 p.

2. Krasnoshlykov A.S., Maksimov V.I. Jeksperimental'noe issledovanie vlijanija konvektivnyh techenij v morozil'noj kamere holodil'nyh ustanovok na skorost' zamorozki produktov // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2014. no. 3 (22). pp. 7–11.

3. Kuznecov G.V., Sheremet M.A. Soprzjzhennaja estestvennaja konvekcija v zamknutoj oblasti pri nalichii teplo-

vydeljajushhego jelementa s postojannoju intensivnost'ju teplovydelenija // Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika. 2010. no. 5 (303). pp. 95–110.

4. Maksimov V.I., Nagornov D.A., Udarcev E.I. Jeksperimental'noe issledovanie estestvennoj i smeshannoj konvekcii v prjamougol'noj oblasti s lokal'nym istočnikom nagreva // Himičeskaja fizika i aktual'nye problemy jenergetiki: sbornik tezisov i statej Vseros. mlad. konf. (Tomsk, 4–6 sent. 2012 g.). Tomsk, 2012. pp. 179–182.

5. Perspektivy primeneniija TN pri utilizacii teploty gorodskih stokov / Slesarenko V.V., Knjazev V.V., Vagner V.V., Slesarenko I.V. // Jenergosberezhenie i vodopodgotovka. 2012. no. 3. pp. 28–33.

6. Sergeev N.N. Teoreticheskie aspekty jenergosberezhenija i povyšeniija jenergetičeskoj jeffektivnosti promyšlennyh predpriyatij // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Jekonomika. 2013. no. 1. pp. 29–36.

Рецензенты:

Заворин А.С., д.т.н., профессор кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок НИ ТПУ, г. Томск;

Кузнецов Г.В., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой теоретической и промышленной теплотехники НИ ТПУ, г. Томск.

Работа поступила в редакцию 27.12.2014.