

УДК 621.3.036

Numerical Simulation of the Heat Transfer Process in the Radiation-Convective Defrosting Device

Yuriy B. Goncharenko*,
Evgenij Iu. Dorogov and Konstantin A. Shtym
*Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690090, Russia*

Received 29.03.2017, received in revised form 17.04.2017, accepted 05.05.2017

In this paper, we consider a numerical method for solving the non-stationary heat transfer problem when coal is heated in a special defrosting device. Frozen coal cannot be unloaded from the car without preheating. The heating rates of coal and car elements were determined experimentally, and the parts most susceptible to overheating were also identified. The problem of optimizing the thermal regime of the defrosting device was not solved in the course of experimental studies, due to operational limitations. Numerical modelling of the process of coal heating in the defrosting device made it possible to circumvent these limitations. As a result, a method is proposed that allows to shorten the time of coal heating by using a special thermal regime.

Keywords: natural convection, heat transfer, defrosting device, numerical simulation, frozen coal, thermal regime, heating element.

Citation: Goncharenko Yu.B., Dorogov E.Iu., Shtym K.A. Numerical simulation of the heat transfer process in the radiation-convective defrosting device, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017, 10(3), 435-443. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-3-435-443.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: goncharenko.yub@dvfu.ru

Численное моделирование процесса теплопередачи в радиационно-конвективном размораживающем устройстве

Ю.Б. Гончаренко, Е.Ю. Дорогов, К.А. Штым
*Дальневосточный федеральный университет
Россия, 690090, Владивосток, ул. Суханова, 8*

В данной статье рассматривается численный метод решения задачи нестационарного теплообмена при разогреве угля в специальном размораживающем устройстве. Смерзшийся уголь невозможно выгрузить из вагона без предварительного разогрева. Экспериментальным способом были определены скорости нагрева угля и элементов вагона, выявлены наиболее подверженные перегреву детали. Вопрос оптимизации теплового режима работы размораживающего устройства не удалось решить в процессе экспериментальных исследований из-за эксплуатационных ограничений. Численное моделирование процесса разогрева угля в размораживающем устройстве позволило обойти эти ограничения. В результате предложен способ, позволяющий сократить время разогрева угля за счет применения специального теплового режима.

Ключевые слова: свободная конвекция, теплопередача, размораживающее устройство, численное моделирование, смерзшийся уголь, тепловой режим, нагревательный элемент.

Введение

Перевозка угля железнодорожным транспортом на Дальнем Востоке имеет ряд особенностей. Первая особенность – удаленность объектов потребления угля от основных месторождений. Это приводит к тому, что уголь находится в пути около 5-10 дней. Второй особенностью при транспортировке является большой перепад температур по пути следования груза. В результате эксплуатация топливно-транспортного хозяйства тепловых электростанций и перегрузочных комплексов угольных портов на Дальнем Востоке в зимнее время сильно осложняется из-за примерзания топлива к бортам и днищам вагонов, что приводит к росту затрат на разгрузку и, как следствие, увеличению доли транспортных затрат в структуре экспорта угля. Особенно остро данная проблема проявляется при больших объемах перегрузки, характерных для угольных терминалов портов, занимающихся экспортом угля.

Для борьбы со смерзаемостью топлива во время перевозки железнодорожным транспортом предусматривается использование профилактических мер или восстановление сыпучести смерзшегося топлива перед разгрузкой. Такими мерами может быть обмасливание внутренних поверхностей вагонов или применение профилактических жидкостей ниогрин и северин. Однако при транспортировке на далекие расстояния, что характерно для Сибири и Дальнего Востока, уголь все равно примерзает к металлическим стенкам. Предварительный разогрев угля в вагонах перед непосредственным процессом разгрузки на данный момент – основной способ восстановления сыпучести смерзшегося топлива на угольных ТЭС и в портах, занимающихся перевалкой угля.

В качестве объекта исследования выбраны размораживающие устройства специализированного угольного терминала АО «Восточный порт», самого крупного порта в России, занима-

ющего перегрузкой угля. Технологическая схема разгрузки топлива состоит из следующих операций:

- a) приход топлива в полувагонах на территорию терминала;
- b) маневровые работы для постановки полувагонов на разогрев;
- c) разогрев топлива в вагоноразмораживающих устройствах (далее тепляках);
- d) маневровые работы для постановки полувагонов в вагоноопрокидыватель;
- e) разгрузка вагонов в вагоноопрокидывателе;
- f) маневровые работы по уходу вагонов с территории терминала.

Пункты b и c выполняются только в холодный период времени года (ориентировочно с октября по март).

Проблемы с разгрузкой появляются в зимний период, так как большую часть в технологической цепочке разгрузки начинает играть разогрев угля. В зимнее время продолжительность разогрева угля в размораживающих устройствах составляет до 50 % от всех операций. Совершенствование конструкции размораживающего устройства становится актуальным, так как позволяет существенно уменьшить общее время разгрузки угля в зимний период.

Одним из основных условий при работе размораживающих устройств, помимо разогрева груза, является поддержание таких условий, в которых бы не возникала опасность повреждения элементов вагонов от воздействия температуры. Сотрудниками кафедры теплоэнергетики и теплотехники ДВФУ совместно с персоналом ОАО «Восточный порт» проведены тепловые испытания размораживающих устройств № 1÷4 [1, 2]. Одной из задач при проведении испытаний было определение безопасных режимов работы размораживающего устройства, в которых отсутствует перегрев элементов вагонов выше допустимой температуры.

В результате проведенных тепловых испытаний получены скорости нагрева угля и отдельных элементов вагона. При сопоставлении полученных скоростей нагрева с предельной температурой, при которой допускается нормальная эксплуатация этих элементов, установлено «безопасное» время разогрева угля, при котором не происходит перегрева отдельных элементов (рис. 1).

При расчете выбиралась максимальная скорость нагрева и начальная температура вагона минус 20 °С. Полученное наименьшее «безопасное» время разогрева для металлической

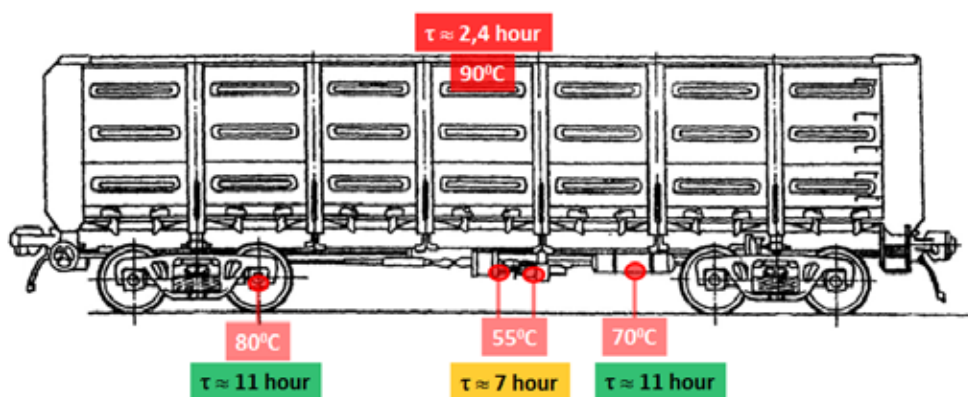


Рис. 1. Безопасное время при разогреве угля в размораживающем устройстве

стенки вагона в несколько раз меньше, чем для остальных элементов вагона (тормозное оборудование, подшипники и т.д.). Можно сделать вывод, что ограничивающим фактором при разогреве вагонов с углем будет являться температурное состояние стенки вагона в верхней части. Результаты экспериментальных исследований позволяют оценить скорость нагрева угля и элементов вагона. Сопоставление различных режимов работы размораживающего устройства представляет определенные сложности в связи с большим количеством параметров, не поддающихся контролю в эксплуатационных условиях, таких как температура наружного воздуха, начальная температура груза, свойства угля. Для решения вышеперечисленных проблем необходимо выполнить численное моделирование процесса теплообмена при разогреве угля в размораживающем устройстве.

Моделирование теплообмена в размораживающем устройстве

Расчетная схема приведена на рис. 2. Задача решалась в двухмерной постановке. В области Ω_1 , характеризующей массив угля, решается уравнение теплопроводности [3]. В области Ω_2 (воздух в размораживающем устройстве) решается система уравнений для естественной тепловой конвекции в приближении Буссинеска [4]. Область Ω_3 характеризует металлическую стенку вагона, в этой области решается уравнение теплопроводности. Область Ω_4 и Ω_5 характеризует металлическое колесо вагона и его наполнение смазочным материалом (полое колесо), в этих областях решается уравнение теплопроводности.

На границах 1, 2, 3 задаются граничные условия 1-го рода, характеризующие температуру нагревательных элементов – паровых регистров t_r , °С. На границе 4 задаются адиабатные условия, без теплообмена. На границе 5 задаются граничные условия 1-го рода, характеризующие

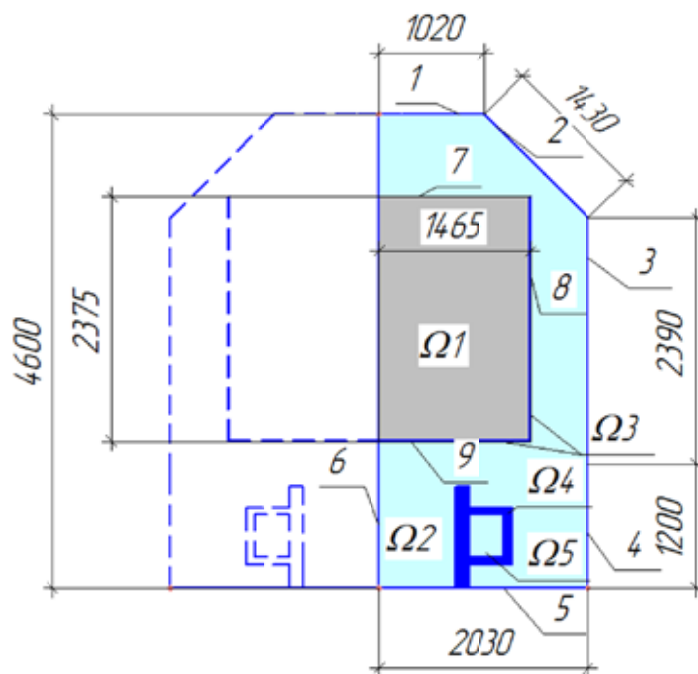


Рис. 2. Расчетная схема при моделировании процесса разогрева угля в вагоне

температуру поверхности $t_{\text{пов}}$, °С. На границе 6 задаются условия симметрии расчетной области, т.е. граница 6 является осью симметрии для указанной расчетной области. На границе 7, 8, 9 задаются граничные условия 4-го рода. На границе областей Ω_2 и Ω_4 , Ω_4 и Ω_5 задаются граничные условия 4-го рода.

При расчете учитывалось тепловое излучение между поверхностями 1, 2, 3, 7, 8, 9 и внешними поверхностями области Ω_4 [5]. Воздух принят как прозрачная среда, не поглощающая излучение. Степень черноты всех поверхностей, участвующих в теплообмене излучением, принята одинаковой и равной 0,8.

Параметры для воздуха (плотность, теплоемкость и вязкость) рассчитывали как для идеального газа и учитывали зависимость от температуры [6]. Металлическая стенка вагона и колесо (области Ω_3 , Ω_4) имели следующие параметры: плотность 7850 кг/м³, теплоемкость 475 Дж/(кг*К), коэффициент теплопроводности 44,5 Вт/(м*К) [7]. Смазочный материал области Ω_5 задавался следующими величинами: плотность 903 кг/м³, теплоемкость 1980 Дж/(кг*К), коэффициент теплопроводности 0,135 Вт/(м*К) [8]. Уголь рассчитывался как однородная изотропная среда с заданными теплофизическими свойствами [9]. Начальные условия для всех областей (Ω_1 , Ω_2 , Ω_3 , Ω_4 , Ω_5) заданы одинаковыми и равными начальной температуре угля t_0 , °С.

Режим течения воздуха возле нагретых тел, вызванный естественной конвекцией, может быть как ламинарным, так и турбулентным. Для определения режима течения необходимо знать число Рэлея, для выбранных начальных условий получено значение числа Рэлея $Ra \approx 1,3 \cdot 10^{11}$. По данным работы [10], развитое турбулентное течение наступает при числах $Ra \geq 6 \cdot 10^6$.

В качестве замыкающей модели турбулентности использовалась стандартная k-ε модель [11] с константами замыкания: $C_m=0,09$; $Sk=1,0$; $Se=1,3$; $C1=1,44$; $C2=1,92$. В расчетной области была построена неравномерная сетка с использованием треугольных элементов с пятью тетраэдральными слоями в пристенной области для разрешения пограничного слоя. Решение производилось методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS.

Результаты численного моделирования

Для проверки представительности разработанной модели выполнено сопоставление расчетных данных с результатами эксперимента. В качестве критериев сопоставления выбраны следующие параметры. Первый параметр – это температура воздуха внутри тепляка на разных высотах с течением времени (рис. 3а). Точками на графике показаны данные эксперимента, линиями – результаты расчета. Данный параметр характеризует температурное поле по высоте размораживающего устройства; если расчетные данные имеют совпадение с экспериментом, это свидетельствует о хорошей сходимости численного решения модели переноса теплоты за счет конвекции. Второй параметр – температура угля, совпадение говорит об адекватном описании процесса распространения теплоты внутри массива угля за счет теплопроводности (рис. 3б). По результатам сопоставления можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов численного моделирования. Разработанная модель может использоваться для исследования влияния режимных характеристик работы размораживающего устройства на процесс разогрева угля в вагонах.

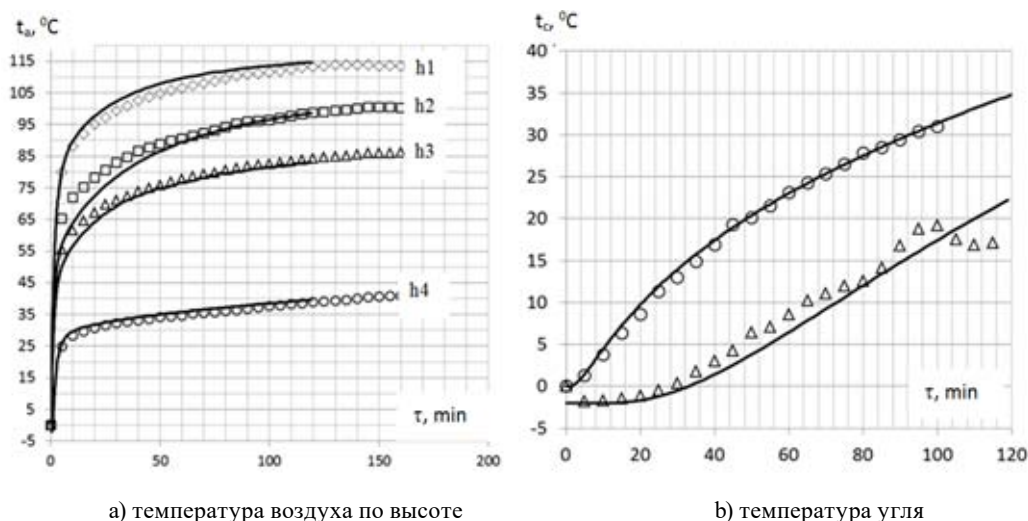


Рис. 3. Сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей

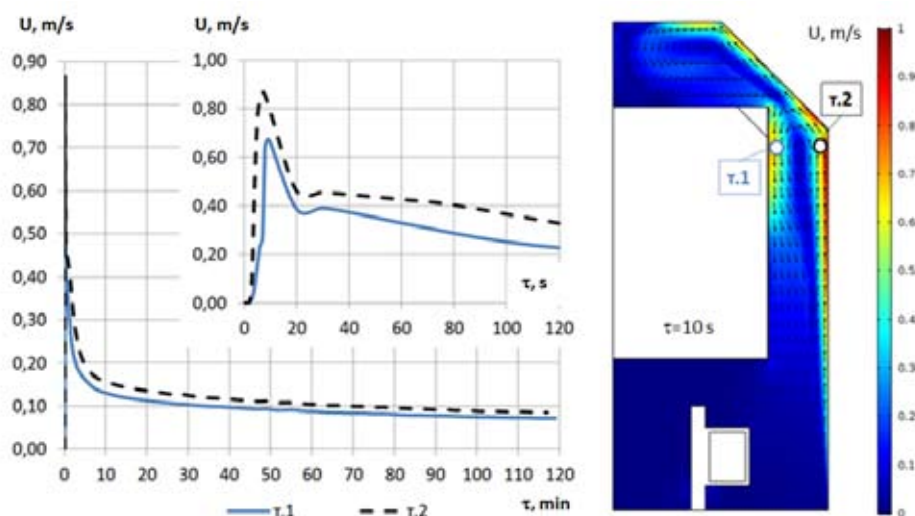


Рис. 4. Скорость движения воздуха в характерных точках

В результате моделирования получено поле скоростей (рис. 4) внутри размораживающего устройства. Интенсивное движение воздуха внутри размораживающего устройства, вызванное разностью плотностей за счет нагрева, имеет очень непродолжительный промежуток времени. Максимальные скорости достигаются для времени $\tau=10$ с и составляют около 0,9 м/с. Потом скорости заметно снижаются. Области воздуха, в которых наблюдается максимальные скорости (до 0,9 м/с) составляют небольшую долю от общего объема воздуха. После $\tau=20$ мин движение воздуха внутри размораживающего устройства практически останавливается. Это свидетельствует о том, что конвективный перенос теплоты имеется только на начальном этапе. В дальнейшем основной перенос теплоты осуществляется за счет теплопроводности и излучения.

Для снижения времени разогрева угля при сохранении безопасных условий для вагона предлагается проводить разогрев при переменной температуре нагревательных элементов. В начальный момент времени нагрев следует вести с максимально возможной температурой, а по мере нагрева стенки вагона до опасного значения – снижать температуру нагревательных элементов до безопасного значения. В результате теплота, полученная в начальный момент времени при больших градиентах температуры, позволит сократить общее время нагрева. Вариант с непрерывно изменяющейся температурой будет давать максимальное снижение времени, но такой вариант сложно реализуем на практике. Дискретное же изменение температуры реализуется легко. Вагон устанавливается в размораживающее устройство, давление пара в нагревательных элементах поднимается до максимально возможного. Через определенное время (это время вычисляется при моделировании) давление пара снижается до безопасного и вагон выдерживается в оставшееся время до полного разогрева угля. Для решения данной задачи необходимо задаться предельным давлением пара в нагревательных элементах. Эксплуатационное давление в размораживающих установках не превышает давления $P_p=0,6$ МПа. Технически на размораживающее устройство можно подать давление пара с величиной $P_p=1,3$ МПа, так как котлы, являющиеся источником пара, имеют номинальное давление пара в барабане $P_b=1,4$ МПа. Эти два давления ($P_p=0,6$ МПа и $P_p=1,3$ МПа) заложены при оптимизации режимов, как лимитирующие факторы по температуре нагревательных элементов. Сопоставление производилось с исходным режимом, при котором температура пара в нагревательных элементах не изменяется. Для такого режима безопасное давление пара в нагревательных элементах составило $P_p=0,32$ МПа, а время разогрева угля $\tau=108$ мин. Режим 1 соответствует начальному давлению пара $P_p=0,6$ МПа, режим 2 – начальному давлению $P_p=1,3$ МПа. На рис. 5 приведены результаты расчета для исходного режима и двух режимов с переменной температурой нагревательных элементов.

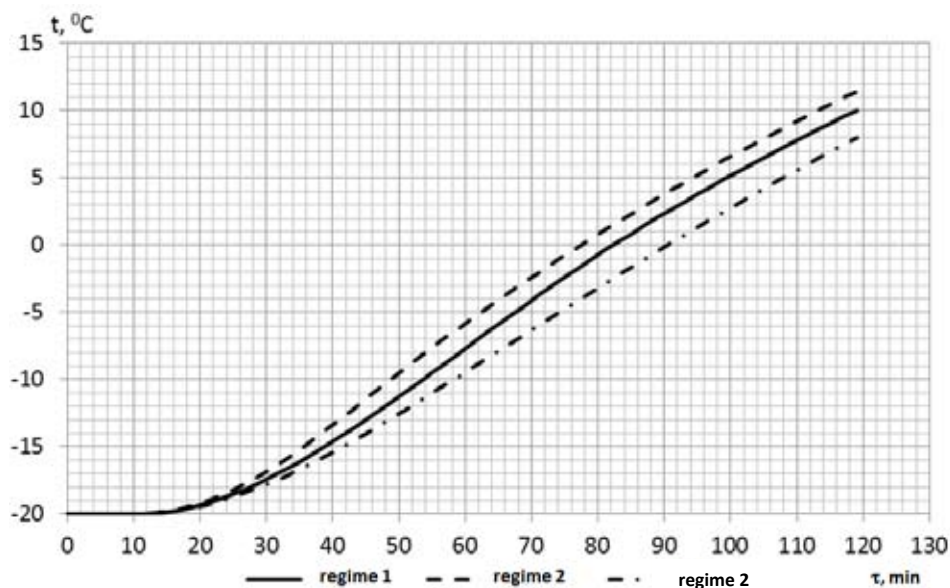


Рис. 5. Нагрев угля при режимах с переменной температурой

В режиме 1 при $R_p=0,6$ МПа и температуре пара в нагревательных элементах $t_{\text{нас}}=162,0$ °С производился разогрев вагонов в течение 55 мин с дальнейшим понижением температуры пара в нагревательных элементах до $t_{\text{нас}}=127,4$ °С, что соответствует давлению $R_p=0,25$ МПа. В режиме 2 давление пара составило $R_p=1,3$ МПа, температура пара в нагревательных элементах $t_{\text{нас}}=191,6$ °С. Производился разогрев вагонов в течение 30 мин с дальнейшим понижением температуры пара в нагревательных элементах до $t_{\text{нас}}=133,5$ °С, что соответствует давлению $R_p=0,3$ МПа. При заданных режимах нагрев угля происходил быстрее, чем стенка вагона перегревалась относительно заданной температуры (90 °С). Снижение времени разогрева угля по сравнению с исходным режимом с постоянной температурой нагревательных элементов составил: для режима 1 – 8,5 мин или 7,9 %, для режима 2 – 13,7 мин или 12,7 %.

Заключение

В результате исследования получены скорости нагрева угля и различных элементов вагона в процессе разогрева в размораживающих устройствах.

Воздействию наиболее высоких температур подвергаются стенки вагона в верхней части. Время пребывания вагонов в тепляке будет ограничивать именно эта деталь вагона.

В результате численного моделирования получена картина переноса теплоты при разогреве. Выявлено, что наиболее интенсивная свободная конвекция наблюдается в течение непродолжительного времени, около 20 мин. Дальнейший процесс переноса теплоты идет в основном за счет теплопроводности и излучения.

Применение режима работы размораживающего устройства с переменной температурой нагревательных элементов позволяет получить экономию времени при разогреве угля на величину от 87,9 до 12,7 %.

Список литературы

[1] Гончаренко Ю.Б., Дорогов Е.Ю. Исследование температурного режима работы тепляков конвективного типа. *Научное обозрение*. 2014. 7-1. 237-240 [Goncharenko Y.B., Dorogov E.Iu. Study of the temperature regime of the operation of convective type heated enclosures, *Science Review*, 2014. 7-1. 237-240 (in Russian)].

[2] Гончаренко Ю.Б., Дорогов Е.Ю. Определение температурного режима тепляков конвективного и радиационного типа. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. S4-21. 81-88 [Goncharenko Y.B., Dorogov E.Iu. Features temperature mode equipment convective and radiative type for heating wagons, *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2014. S4-21. 81-88 (in Russian)].

[3] Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. М.: Энергия, 1977. 344 с. [Miheev M.A., Miheeva I. M. *Heat transfer base*. Moscow, Energiya, 1977, 344 p. (in Russian)]

[4] Андреев В.К. и др. *Современные математические модели конвекции*. М.: Физматлит, 2008. 368 с. [Andreev V.K. and other. *Modern mathematical models of convection*. Moscow, Fithmatlit, 2008. 368 p. (in Russian)]

[5] Григорьев В.А., Зорин В.М. *Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент*. Кн. 2. М. : Энергоатомиздат, 1988. 560 с. [Grigoryev V.A., Zorin V.M. *Theoretical*

bases of heat engineering. Thermal Engineering experiment. В. 2, Moscow, Energoatomizdat, 1988, 560 p. (in Russian)]

[6] Юренев В.Н., Лебедев П.Д. *Теплотехнический справочник*. Кн. 2. М.: Энергия, 1976. 896 с. [Yurenyev V.N., Lebedev P.D. *Heat engineering reference book*. В. 2, Moscow, Energiya, 1976, 896 p. (in Russian)]

[7] Поливанов П.М., Поливанова Е.П. *Таблицы для подсчета массы деталей и материалов*. М.: Машиностроение, 2003. 304 с. [Polivanov P.M., Polivanova E.P. *Tables for calculating the mass of parts and materials*. Moscow, Mashinostroeniye. 2003. 304 p. (in Russian)]

[8] Чиркин В.С. *Теплофизические свойства материалов*. М.: Физматгиз, 1959. 356 с. [Chirkin V.S. *Thermophysical properties of materials*. Moscow, Phismatgiz. 1959. 356 p. (in Russian)]

[9] Батраков И.И. *Перевозка смерзающихся грузов*. М.: Транспорт, 1988. 206 с. [Batrakov I.I. *Transportation of frozen cargo*. Moscow, Transport. 1988. 206 p. (in Russian)]

[10] Пчёлкин И.М. *Теплоотдача вертикальных труб при естественной конвекции. Конвективный и лучистый теплообмен*. М.: АН СССР, 1960. 56–64. [Pchelkin I.M. *Heat transfer of vertical pipes with natural convection. Convective and radiant heat transfer*. Moscow, AN SSSR. 1960. 56-65. (in Russian)]

[11] Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Турбулентная естественная конвекция в замкнутой полости с теплопроводными стенками конечной толщины. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2009. 4. 66-83 [Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Turbulent natural convection in a closed cavity with heat-conducting walls of finite thickness. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2009. 4. 66-83 (in Russian)]