

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА РАЗМОРАЖИВАНИЯ ГРУЗА В ПОЛУВАГОНЕ

БЕЛЯЕВ Н. Н.^{1*}, *д.т.н., проф.*,
КАРПО А. А.², *соискатель.*

^{1*} Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3201-8435

Аннотация. *Цель.* Разработка метода расчета процесса размораживания угля в полувагонах перед подачей их в вагонопрокидыватель. Существующие методы расчета основывается в основном на использовании регрессионных моделей построенных путем обработки результатов эксперимента. Эти модели имеют узкую зону применения, поскольку их возможности ограниченные диапазоном рабочих параметров, которые были реализованы при проведении экспериментов. Аналитические модели дают упрощенную картину процесса размораживания и могут быть использованы лишь для оценочных расчётов. Численные модели требуют значительных затрат компьютерного времени при практической реализации и их применение ограничено в настоящее время в инженерной практики. Поэтому возникает необходимость создания эффективных методов расчета процесса размораживания угля, которые не требовали больших затрат при практической реализации на компьютере и основывались на фундаментальных уравнениях теплопереноса. **Методика.** Разработанный метод расчета процесса размораживания угля в полувагонах основывается на численном интегрировании одномерного уравнения теплопроводности. Расчет осуществляется с помощью неявного попеременно – треугольного метода А. А. Самарского. При практической реализации данного метода затраты компьютерного времени составляют менее одной секунды. **Результаты.** На основе построенной численной модели разработана программа на алгоритмическом языке FORTRAN. С помощью данной программы выполнен вычислительный эксперимент по оценке динамики размораживания угля в полувагоне. Расчет выполнен в узкой подзоне расположенной вблизи стенки полувагона, которая прогревается за счет использования элементов инфракрасного излучения. Установлено время прогрева зоны для двух различных значений температуры стенки полувагона. **Научная новизна.** Разработан эффективный метод экспресс расчета процесса размораживания угля в полувагонах при использовании элементов инфракрасного излучения. Метод расчета основан на численном интегрировании уравнения теплопереноса. **Практическая значимость.** Разработанная компьютерная программа позволяет с минимальными затратам рабочего времени проводить серийные расчёты по обоснованию параметров элементов инфракрасного излучения и выбора рационального режима их работы при размораживании угля в гаражах размораживания.

Ключевые слова: размораживание угля, численное моделирование, теплоперенос, разностные схемы

ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ РОЗМОРОЖУВАННЯ ВАНТАЖУ У НАПІВВАГОНІ

БІЛЯЄВ М. М.^{1*}, *д.т.н., проф.*,
КАРПО А. О.², *здобувач.*

^{1*} Кафедра «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Кафедра «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3201-8435

Анотація. *Мета.* Розробка методу розрахунку процесу розморожування вугілля в напіввагонах перед подачею їх в вагоноперекидач. Існуючі методи розрахунку ґрунтується в основному на використанні регресійних моделей побудованих шляхом обробки результатів експерименту. Ці моделі мають вузьку зону застосування, оскільки їх можливості обмежені діапазонах робочих параметрів, які були реалізовані при проведенні експериментів. Аналітичні моделі дають спрощену картину процесу розморожування і можуть бути використані лише для оціночних розрахунків. Чисельні моделі вимагають

значних витрат комп'ютерного часу при практичній реалізації і їх застосування обмежене в даний час в інженерній практиці. Тому виникає необхідність створення ефективних методів розрахунку процесу розморожування вугілля, які не вимагали великих витрат при практичній реалізації на комп'ютері і ґрунтувалися на фундаментальних рівняннях тепломасопереносу. **Методика.** Розроблений метод розрахунку процесу розморожування вугілля в напіввагонах ґрунтується на чисельному інтегруванні одновимірних рівняння теплопровідності. Розрахунок здійснюється за допомогою неявного поперемінно - трикутного методу А. А. Самарського. При практичній реалізації даного методу витрати комп'ютерного часу складають менше однієї секунди. **Результати.** На основі побудованої чисельної моделі розроблена програма на алгоритмічній мові FORTRAN. С допомогою даної програми виконаний обчислювальний експеримент по оцінці динаміки розморожування вугілля в напіввагоні. Розрахунок виконаний у вузькій підзоні розташованої поблизу стінки піввагона, яка прогрівається за рахунок використання елементів інфрачервоного випромінювання. Встановлено час прогріву зони для двох різних значень температури стінки піввагона. **Наукова новизна.** Розроблено ефективний метод експрес розрахунку процесу розморожування вугілля в піввагонах при використанні елементів інфрачервоного випромінювання. Метод розрахунку заснований на чисельному інтегруванні рівняння теплопереносу. **Практична значимість.** Розроблена комп'ютерна програма дозволяє з мінімальними витратами робочого часу проводити серійні розрахунки по обґрунтуванню параметрів елементів інфрачервоного випромінювання та вибору раціонального режиму їх роботи при розморожуванні вугілля в гаражах розморожування.

Ключові слова: розморожування вугілля, чисельне моделювання, теплоперенос, різниці схеми

NUMERICAL CALCULATION OF CARGO HEATING IN THE RAILWAY WAGON

BELIAIEV M. M. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KARPO A. A. ², *applicant*.

^{1*} Department of «Hydraulics and water supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk 49010, Ukraine, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: gidravluka2013@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Department of «Hydraulics and water supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk 49010, Ukraine, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: alichka-88.karpo@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3201-8435

Abstract. Purpose. The developed method of calculating the thawing coal in the gondola car before feeding them into the car dumper. Existing methods of calculation are based mainly on the use of regression models constructed by means of processing the results of the experiment. These models have a narrow area of application, as their abilities are limited within the range of operating parameters that have been implemented in experiments. Analytical models provide a simplified picture of the defrosting process, and can only be used for evaluative calculations. Numerical models require significant computer time in terms of practical implementation and their utilization is currently limited at the stage of engineering practice. Therefore there is a need of effective methods of calculating of the process of thawing coal, which would not require large expenditures while practical implementation on a computer and based on the fundamental equations of heat and mass transfer. **Methodology.** The developed method for calculating the thawing coal in gondola cars is based on numerical integration of the one-dimensional heat equation. The calculation is performed using the implicit alternating - triangular method A.A. Samarskiy. When in practice, this method consumes less than one second of computer time. **Findings.** The program operating with the algorithmic language FORTRAN was developed on the basis of the numerical model. The computer experiment for assessing the dynamics of thawing coal in the gondola car was done with the help of this program. The calculation is performed in a narrow sub-zone, located near the wall of the gondola, that is heated by means of infrared radiation elements. There have been established warm-up time zones for two different values of the temperature of the wall of the gondola car. **Originality.** An efficient method for calculating the express defrosts coal gondola cars using infra-red radiation elements was developed. The calculation method is based on numerical simulations of heat transfer. **Practical value.** This computer program allows carrying out calculations with minimal staff time for substantiation of the serial parameters of infra-red elements and the choice of a rational mode of operation during defrosting of coal in the thawing garages.

Keywords: defrost coal, numerical simulation, heat transfer, finite difference schemes

Введение

Как известно, в Украине бывают частые перепады температур в зимний период времени, которые создают проблемы при транспортировке и выгрузке угля из железнодорожных полувагонов. Дальнепривозные угли поступают на станции в сильно замороженном состоянии, что значительно затрудняет оперативную выгрузку полувагонов. Зачастую полувагоны после вагоноопрокидывателя

приходится зачищать «вручную», использовать грейферы и другую технику. При этом производительность труда невысока, повреждаются вагоны, очень велика вероятность производственного травматизма. Поэтому перед выгрузкой угля из вагонов используется различные технологии по размораживанию сыпучих грузов [9]. Одной из таких технологий является применение элементов с инфракрасным излучением (ИК) (рис. 1). Однако в

настоящее время существует определенный дефицит расчетных методов, с помощью которых можно было бы обосновать режим размораживания груза. Таким образом, возникает важная задача по созданию таких методов расчета.

Анализ литературных источников. Проблеме расчета разогрева замороженного груза в полувагонах уделялась достаточно большое внимание. Для решения этой задачи использовались различные математические модели, а именно, регрессионные модели, построенные на основе многочисленных экспериментальных исследований [4,5,6,7,8,], аналитические модели [15], численные [3, 10, 11] и имитационное моделирование [13]. Эти модели позволяют учесть те или иные факторы, влияющие на процесс разогрева груза. Однако вопрос создания эффективной прикладной модели для расчета тепловых процессов в рамках данной проблемы остается еще открытым. В настоящее время инженеры нуждаются в достаточно простой методике расчета размораживания угля, позволяющей учесть наиболее существенные физические факторы, влияющие на этот процесс.

Цель

Целью данной работы является создание эффективного метода расчета разогрева грузов полувагона при использовании элементов ИК и основанного на численном интегрировании уравнения в теплопереноса.



Рис. 1. Размещение вагона с углем в цеху углеподготовки: 1 – элементы с инфракрасным излучением для размораживания угля / Allocation of wagon with coal in coalshop: 1 - infrared elements for defrosting coal.

Методика

Для разработки оперативного метода расчета процесса прогрева угля в полувагоне при работе элементов ИК сделаем ряд упрощений. На рис. 2 показана схема полувагона, где размещается замороженный уголь. Расчет процесса прогрева угля при тепловом воздействии от элементов ИК будем выполнять вдоль прямой, начало которой находится на одной из вертикальных стенок вагона (например, стенка АС). Поскольку коэффициент теплопроводности стальной стенки вагона

значительно больше, чем коэффициент теплопроводности угля, будем пренебрегать тепловым сопротивлением стальной стенки вагона. Таким образом, на левой границе расчетной области ($x=0$) температура будет соответствовать температуре, которую создает элемент ИК возле стенки вагона.

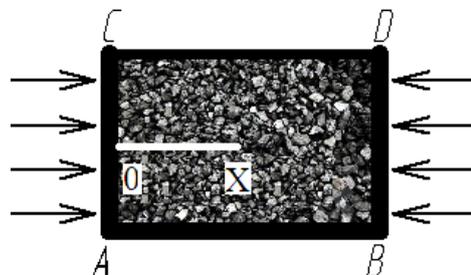


Рис. 2 Схематизация зоны размораживания / Schematization of defrosting zone

В этом случае моделирующее уравнение имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где $a_x = \frac{\lambda_x}{c\rho}$, коэффициент

температуропроводности,

λ_x – коэффициент теплопроводности,

c – коэффициент теплоемкости,

ρ – плотность угля

На границах расчётного участка задаются граничные условия первого рода, а в качестве начального условия принимается, что на всем участке температура равна температуре замершего угля, с которой вагон заходит в гараж размораживания. Ставится задача расчета времени размораживания угля возле стенки вагона.

Численное решение моделирующих уравнений.

Для численного интегрирования уравнения теплопроводности применяется метод А.А. Самарского [12]. В этом случае, численные решения уравнения теплопроводности расщепляется на два шага и разностные соотношения имеют вид.

$$\frac{T_i^{n+1/2}}{0,5\Delta t} = \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{\Delta x^2} + \frac{-T_i^{n+1/2} + T_{i-1}^{n+1/2}}{\Delta x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^{n+1/2}}{0,5\Delta t} = \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-T_i^{n+1/2} + T_{i-1}^{n+1/2}}{\Delta x^2} \quad (3)$$

На основе данных разностных соотношений составлена программа на алгоритмическом языке FORTRAN.

Результаты

На базе построенной численной модели выполнен расчет прогрева угля в полувагоне (рис. 2) расчет выполнялся при следующих исходных данных [1,2]: длина расчетной области 1,5 см; коэффициент температуропроводности $0,013 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [2]; на левой границе расчетного участка принимается, что температура постоянна. Вычислительный эксперимент проведем для двух значений этой температуры. В первом варианте на левой границе температура составляет 80°C (нагрев за счет работы элементов ИК), а во втором варианте – 65°C . На правой границе расчетного участка полагается, что температура угля равна -10°C . В начальный момент времени полагается, что на всем расчетном участке температура угля составляет -10°C .

В табл. 1 и 2 представлены результаты вычислительного эксперимента. В табл. 1 показано значение температуры угля вблизи стенки вагона и как эта температура изменяется с течением времени.

Таблица 1

Динамика прогрева угля в вагоне (первый вариант) / Dynamics of coal warming up in the wagon (the first option)

Расстояние от стенки вагона	t=54 сек	t=125 сек	t=180 сек
2 мм	49.31 °C	59.63 °C	62.88 °C
5 мм	11.58 °C	29.91 °C	36.86 °C
7 мм	-1.35 °C	14.96 °C	22.52 °C
9 мм	-7.17 °C	4.31 °C	11.02 °C
10 мм	-8.51 °C	0.418 °C	6.29 °C

Как видно из представленных данных прогрев зоны на расстоянии порядка 1см от стенки вагона до температуры порядка $5-6^\circ \text{C}$ произойдет в течение 3х минут. Для прогрева угля на большее расстояние, безусловно, потребуются дальнейшая работа элементов ИК.

В табл. 2 представлены данные о прогреве угля в полувагоне, но при условии что температура, которая создается ИК ниже, чем в предыдущем варианте и составляет 65°C .

Таблица 2

Динамика прогрева угля в вагоне (второй вариант) / Dynamics of coal warming up in the wagon (the second option)

Расстояние от стенки вагона	t=54 сек	t=125 сек	t=180 сек
2 мм	39.41 °C	48.02 °C	20.73 °C
5 мм	7.96 °C	23.24 °C	29.04 °C
7 мм	-2.81 °C	10.79 °C	17.09 °C
9 мм	-7.66 °C	1.92 °C	7.51 °C
10 мм	-8.76 °C	-1.33 °C	3.57 °C

Как видно из анализа данным приведённых в этой таблице темп размораживания замедляется, например для момента времени $t = 180 \text{ с}$ температура угля на расстоянии 1 см от стенки вагона составляет $3,57^\circ \text{C}$ (это значение составляет $6,29^\circ \text{C}$ для первого варианта).

В заключении отметим, что расчет с помощью построенной модели требует 0,5 с компьютерного времени, т.е. предложенная модель может быть использована для экспресс прогноза теплового режима в инженерных расчетах.

Научная новизна и практическая значимость

Разработан эффективный метод экспресс расчета процесса размораживания угля в полувагонах при использовании элементов инфракрасного излучения. Метод расчета основан на численном интегрировании уравнения теплопереноса.

Разработанная компьютерная программа позволяет с минимальными затратам рабочего времени проводить серийные расчёты по обоснованию параметров элементов инфракрасного излучения и выбора рационального режима их работы при размораживании угля в гаражах размораживания.

Выводы

В работе предложена эффективная численная модель для расчета процесса прогрева угля в полувагонах. Модель основывается на численном решении одномерного уравнения теплопроводности. Дальнейшее развитие данного следует проводить в направлении создания многомерной модели теплового прогрева угля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Беляев, Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: Монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: Акцент ПП, 2014. – 127 с.
Belyaev, N. Modelling of non-stationary processes of accidental pollution of the atmosphere: Monograph / N.N. Belyaev, A.V. Berlov, P.B. Mashihina. – D.: Aktsent, 2014. – 127 p.
2. Крейт Ф. Основы теплопередачи. / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
Crate F. Fundamentals of heat transfer. / F. Crate, W. Black – М.: Mir, 1983. – 512 p..
3. Кожевников, Н.Н. Прогнозирование процессов промерзания в сыпучих материалах при железнодорожных перевозках / Н.Н. Кожевников, В.И. Попов. – Новосибирск: Наука, 1978. – 104 с.
Kozhevnikov, N. N. Forecasting the process of freezing in bulk materials at railway transportation / N. N. Kozhevnikov, V. I. Popov. – Novosibirsk: Nauka, 1978. – 104 p.
4. Парунакян, В.Э. Исследование процесса обработки вагонопотока с сырьем грузовой станции металлургического завода в переходные периоды / В.Э. Парунакян, Ю.В. Гусев, В.Г. Гонтовой // Вестник Приазовского государственного технического университета: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 2001. – Вып. № 11 – С. 285-289.
Parunakyan, V. E. Investigation process wagon stream processing with raw materials freight station steel plant in transitional periods / V. E. Parunakyan, Yu. V. Gusev, V. G. Shingle // Bulletin of the Priazovsky state technical University – Mariupol, 2001. – Vol. No. 11 – P. 285-289.
5. Парунакян, В.Э. Исследование процесса размораживания железосодержащего сырья в вагонах с использованием компьютерной технологии “DATA MINING” / В.Э. Парунакян, В.Г. Дженчако // Вестник Приазовского государственного технического университета: Серия: Технические науки - Мариуполь, 2010. – Вып. № 20 – С.267-274.
Parunakyan, V.E. Investigation of the defrosting process of ironcontaining raw material in cars using computer technology «DATA MINING» / V.E. Parunakyan, V.G. Djenchako // Bulletin of the Priazovsky state technical University: Series: Technical Sciences – Mariupol, 2010. – Vol. No. 20 – P. 267-274.
6. Парунакян, В.Э. Методика определения продолжительности разогрева грузов в конвективных гаражах размораживания / В.Э. Парунакян, В.Г. Дженчако // Вестник Приазовского государственного технического университета: Сб. науч. тр. - Мариуполь, 2004. – Вып. № 14 – С. 319-322.
Parunakyan, V. E. Method of determining the duration of the heating loads in convective garages defrost / V. E. Parunakyan, V. G. Genaco // Bulletin of the Priazovsky state technical University. – Mariupol, 2004. – Vol. No. 14. – P. 319-322.
7. Парунакян, В.Э. Определение продолжительности разогрева груза в вагонах на основе метода планирования эксперимента / В.Э. Парунакян, В.Г. Дженчако // Вестник Приазовского государственного технического университета: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 2006. – Вып. № 16 – С. 233 – 239.
Parunakyan, V. G. Genaco // Bulletin of the Priazovsky state technical University – Mariupol, 2006. – Vol. No. 16 – P. 233 – 239.
8. Парунакян, В.Э. Разработка методологии определения продолжительности разогрева грузов в конвективных гаражах размораживания / В.Э. Парунакян, В.Г. Дженчако // Вестник Приазовского государственного технического университета: Сб. науч. тр. - Мариуполь, 2006. – Вып. № 16 – С. 93 – 99.
Parunakyan, VE Development of the methodology for determining the duration of the heating loads in konvekimvnyh garages thawing / VE Parunakyan, VG Dzhenchako // Bulletin of the Priazovsky state technical University. – Mariupol, 2006. – Vol. No. 16 – P. 93 – 99.
9. Парунакян, В.Э. Совершенствование процесса приема и обработки вагонопотока с сырьем грузовой станции металлургического завода в зимний период / В.Э. Парунакян, В.Г. Дженчако // Вестник Приазовского государственного технического университета: Сб. науч. тр. – Мариуполь, 2003. – Вып. № 13 – С. 272-275.
Parunakyan, V. E. Improving the process of receiving and processing wagon stream with raw materials freight station steel plant in winter / V.E. Parunakyan, V.G. Genaco // Bulletin of the Priazovsky state technical University – Mariupol, 2003. – Vol. No. 13 – P. 272-275.
10. Патанкар, С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С.В. Патанкар – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
Patankar S. V., Numerical methods for solving heat transfer and fluid dynamics / S. V. Patankar, М.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
11. Приходько, А.А. Математическое моделирование нестационарных процессов замораживания и размораживания пористых сред / А.А. Приходько, С.В. Алексеенко // Сборник научных статей «Современная наука: тенденции развития, проблемы и перспективы» – Бугульма, РФ, 2012. – Вып. № 2(10) – С. 57-63.
Prikhodko, A. A. Mathematical modeling of transient processes of freezing and thawing of porous media / A. A. Prikhod'ko, S. V. Alekseenko // Modern science: researches, ideas, results, technologies – Bugulma, Russian Federation, 2012. – Vol. No. 2(10) – P. 57-63.
12. Самарский, А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
Samarsky, A.A. The theory of difference schemes. – М.: Nauka, 1983 – 616 p.
13. Соловьев, В.А. Математическая модель одного из возможных путей снижения энергозатрат при разгрузке вагонов со смерзшимся углем / В.А. Соловьев, М.Г. Подвицкий // Журнал «Современные наукоемкие технологии». – Москва, 2013. – Вып. № 8 – С. 227-229.
Soloviev, V. A. Mathematical model of a possible way to reduce energy consumption when unloading wagons with frozen coal / V. A. Soloviev, M. G. Podwiki // The journal «Modern high technologies». – Moscow, 2013. – Vol. No. 8 – P. 227 – 229.
14. Цытович, Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович – М.: Выс. школа, 1973. – 446 с.
Tsytovich, N. A. Mechanics of frozen soils / N.A. Tsytovich. – М.: High. school, 1973. – 446 p.
15. Яковенко, В.О. Математичне моделювання процесу роздібнення замерзлих насипних вантажів у залізничних вагонах з використанням мікрохвильової енергії / В. О. Яковенко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. - Вип. 20. – С. 208-212.

Yakovenko, V. A. Mathematical modeling of process of crushing the frozen bulk cargo in railway cars using microwave energy / U. A. Yakovenko // Bulletin of Dnipropetrovsk

National University of Railway Transport. – Dnipropetrovsk, 2008. – Vol. 20. – P. 208-212.

Стаття рекомендована к публикации

Поступила в редколлегию
Принята к печати