

Научная статья

УДК 536.21

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-80-85

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОМОРАЖИВАНИЯ И РЫХЛЕНИЯ СЛОЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ СЫПУЧЕСТИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Попов Владимир Иванович

Институт горного дела Севера имени Н. В. Черского СО РАН

* для корреспонденции: popov.gtf@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

10 октября 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

22 апреля 2025 г.

Принята к публикации:

30 апреля 2025 г.

Опубликована:

11 июня 2025 г.

Ключевые слова:

смерзание сыпучего материала, цифровой двойник, оптимизация, перемешивание, управляющее воздействие.

Аннотация.

В зоне действия отрицательных температур среды охлаждения, при перевозках и складировании влажных сыпучих материалов происходит его частичное или полное, в зависимости от длительности воздействия отрицательных температур, смерзание. В этом случае возникает необходимость принятия различных превентивных мер, обеспечивающих возможность сохранения сыпучих свойств используемых материалов в условиях складирования и транспортировки. В настоящее время существует достаточно широкий спектр различных мероприятий, включающих применение различных солей, снижающих температуру замерзания груза, гидрофобных добавок, замещающих непосредственный контакт между смоченными частицами груза масляными прослойками, а также использование реагентов, имеющих более высокую степень адгезии к частицам сыпучего груза и замещающим контакт с ними водных пленок. Крайним и труднодостижимым мероприятием является полное устранение из рассматриваемых систем смерзающего компонента – воды. Практическим аналогом данного способа выбрано промораживание слоя влажного материала с последующим рыхлением (перемешиванием) как наиболее доступный и простой в технической реализации. В рамках метода динамического программирования составлена математическая модель процесса промораживания слоя влажного сыпучего материала. В качестве управляющего воздействия принята процедура рыхления (перемешивания) слоя материала и момент ее применения. Составлена программа – цифровой двойник процесса промерзания слоя материала, с помощью которой определен оптимальный момент применения процедуры рыхления (перемешивания) для слоев груза различной толщины, при разных значениях температуры среды охлаждения. Данный подход позволяет существенно, в 2–3 раза, сократить сроки предварительного промораживания груза при подготовке к перевозкам или складированию по сравнению с естественным ходом процесса промерзания (без перемешивания).

Для цитирования: Попов В.И. Оптимизация процессов промораживания и рыхления слоя материала для сохранения сыпучести при отрицательных температурах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 2 (168). С. 80-85. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-80-85, EDN: IPFSDI

Введение

Радикальным способом предотвращения смерзания влажных сыпучих материалов является предварительное их обезвоживание до

уровня безопасной влажности, индивидуальной для каждого материала. К сожалению, этот процесс в широком применении энергетически не выгоден и экономически приводит к большим

затратам. В настоящее время широко распространены различные профилактические мероприятия по борьбе со смерзаемостью, цель которых – предупредить смерзание и обеспечить сохранение сыпучести мерзлого груза [1-13]. Используются различные гидрофильные и гидрофобные препараты, первые связывают влагу материала в своем объеме, вторые создают на поверхностях раздела покрытия, препятствующие смерзанию. Широко применяются физические и механические способы борьбы со смерзаемостью. К первым относят замораживание материала груза, которое снижает содержание жидкой фазы воды, а последующее разрушение промерзшей корки классифицируют как механический способ.

Наиболее рациональны профилактические меры, заключающиеся в снижении влажности груза путем заморозки перед погрузкой с последующим механическим рыхлением (пересыпанием). Для каждого насыпного груза существует нижний предел влажности, зависящий от строения минерального скелета материала, его химического состава и других свойств, определяющих влагосодержание, при котором его частицы не смерзаются даже при самых низких температурах среды охлаждения.

В условиях устойчивых морозов эффективной мерой предохранения насыпных грузов от смерзания в вагонах в пути следования является предварительное (до погрузки) промораживание груза, совмещенное с многократным рыхлением (перемешиванием) его массы экскаватором, скрепером, грейферным краном или другим механизмом [14]. При этом необходимо, чтобы частицы груза возможно лучше обветривались наружным воздухом. Промораживание может считаться законченным после достижения в середине слоя пересыпаемого груза температуры минус 3° С и ниже [14].

Постановка задачи

Таким образом, складывается следующая картина подготовки влажного сыпучего материала к складированию или последующей транспортировке. Влажный материал размещается в виде слоя фиксированной толщины на площадке определенных размеров, исходя из плановых потребностей узла подготовки. Первоначально определяется время промерзания слоя заданной толщины, размещенного на площадке под действием конвективного теплообмена, со средой охлаждения T_{cp} на верхней поверхности слоя. Для простоты допускаем, что на нижней поверхности слоя материала теплообмен отсутствует и охлаждение происходит только с верхней поверхности.

Процесс промерзания слоя (0, L) влажного сыпучего груза с начальной температурой $T_0=10^{\circ}\text{C}$ описывается системой двух параболических уравнений диффузионного переноса тепла и влаги [15].

$$1) \text{ Уравнение теплопроводности} \\ \frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L\rho \frac{\partial m}{\partial t} \quad (1)$$

$$2) \text{ Уравнение переноса влаги} \\ \frac{\partial(w)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial m}{\partial t} \quad (2)$$

Система уравнений замыкается уравнением состояния поровой влаги, определяющим зависимость фазового состояния от температуры и концентрации солей $m=m(T,C)$ [15]. Примем граничные условия, обеспечивающие отсутствие диффузионных потоков с обеих сторон слоя для уравнения переноса влаги и конвективное охлаждение с верхней стороны слоя и отсутствие теплопотока с противоположной стороны для уравнения теплопроводности.

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial w}{\partial x} &= 0 && \text{при } x=0, L \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 && \text{при } x=0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha(T_{x=L} - T_{cp}) && \text{при } x=L \end{aligned} \quad (3)$$

Суть предлагаемого подхода подготовки смерзающихся сыпучих грузов к складированию и транспортировке в транспортных сосудах при отрицательных температурах окружающей среды заключается в процедуре выбора оптимального момента применения операции рыхления (перемешивания) промораживаемого слоя сыпучего влажного материала [16]. В этом случае происходит процесс интенсификации конвективного теплообмена на поверхности слоя материала, а средняя температура слоя после перемешивания соответствует диапазону окончания в нем интенсивных фазовых переходов. Таким образом, дальнейшее охлаждение слоя происходит в режиме кондуктивной теплопроводности, не отягощенной энергетическими затратами на фазовый переход вода-лед.

Выбор оптимального момента применения операции рыхления определяется из имитационного анализа поведения целевой функции, представляющей разность квадратов температур среды охлаждения T_{cp} и температур груза T_i по толщине слоя.

В качестве целевой функции, отражающей степень завершенности процесса промерзания слоя при температуре среды охлаждения, равной T_{cp} , введем функцию

$$B_j = \sum_{i=1}^{i=N} (T_{cp}^2 - T_{ij}^2)$$

где индекс i обозначает суммирование по узловым значениям температуры, а индекс j – пошаговые моменты времени. Значение целевой функции – определить степень завершенности процесса промораживания слоя или иначе

степень близости температур слоя и среды охлаждения.

Алгоритм оптимизации профилактических действий в рамках метода динамического программирования [16] сводится к следующим операциям.

1. Решается задача теплопроводности и диффузии влаги в слое груза при замерзании. При этом определяется время достижения температуры нижней границы слоя значений, равных минус $0,5^{\circ}\text{C}$, при заданном конвективном граничном условии охлаждения на верхней границе слоя $x=L$. Это будет время $T_{\text{зам1}}$ промерзания слоя при чистой теплопроводности без применения процедуры рыхления (перемешивания). Для различных сочетаний толщин слоя влажного сыпучего материала и температур среды охлаждения время достижения температуры нижней границы слоя значений равных минус $0,5^{\circ}\text{C}$ приведено в Таблице 1.

2. Вводится управляющее однократное воздействие, которое представляет процесс

Таблица 1. Время промораживания $T_{\text{зам1}}$ (час) без перемешивания

Table 1. Freezing time $T_{\text{зам1}}$ (hour) without stirring

Толщина слоя(м)	Температура среды $^{\circ}\text{C}$			
	-10	-20	-30	-40
0,1	30,1	18,6	13,7	11,2
0,2	110	67,2	50,4	41,3
0,3	241	147	110	90,2
0,4	422	257	193	158

рыхления (перемешивания) слоя по вертикали. Его математическим эквивалентом является операция осреднения температуры слоя по вертикали.

3. Результатом управляющего воздействия будет интенсификация конвективного граничного условия на верхней поверхности слоя при $x=L$ и понижение средней температуры по слою в сравнении с промораживанием без рыхления (перемешивания).

4. Затем в диапазоне времени $0, T_{\text{зам1}}$ решается спектр задач по промораживанию слоя груза. При этом дискретно с шагом h_T для каждой задачи в интервале $[0, T_{\text{зам1}}]$ меняется время приложения управляющего воздействия $T_y = T_y + h_T$. В расчетах принято $h_T = 1$ час.

На Рис. 1 зафиксированы значения и изменения целевой функции для различных моментов времени промораживания и применения управляющего воздействия.

5. На основе анализа значений целевой функции определяется оптимальное время приложения воздействия, которое приводит к ускорению процесса промерзания.

6. Данная процедура применяется для всех сочетаний температур среды охлаждения и толщин слоя груза.

Результаты

На Рис. 1 представлены графики значений целевой функции при промораживании слоя без рыхления (перемешивания) (1); с добавлением перемешивания через 9 часов после начала процесса график (2); с добавлением перемешивания через 14 часов после начала процесса график (3); с добавлением перемешивания через 17 часов после начала процесса график (4).

Результатами расчетов установлено, что при конкретном значении температуры среды - 20°C и толщине слоя подготовленного к проморозке, равного 0,2 м, оптимальное время для однократного перемешивания начинается с момента процесса, равного 14 часов, когда примерно 33% толщины слоя будет иметь отрицательную температуру в диапазоне $[T_{\text{ср}}, -0,5^{\circ}\text{C}]$.

В Таблице №2 приведены значения

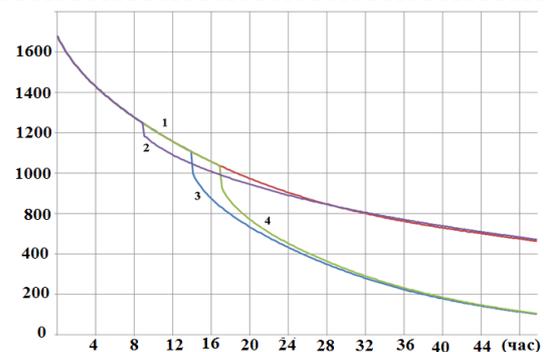


Рис. 1. Значения целевой функции для различных моментов времени

промораживания и перемешивания слоя груза
Fig. 1. Values of the objective function for different moments of time of freezing and mixing of the cargo layer

Таблица 2. Момент оптимального включения процедуры перемешивания с начала процесса промораживания (час)

Table 2. The moment of optimal activation of the mixing procedure from the beginning of the freezing process (hour)

Толщина слоя (м)	Температура среды, $^{\circ}\text{C}$			
	-10	-20	-30	-40
0,1	10	5	3	3
0,2	33	14	10	7
0,3	70	34	20	13
0,4	121	57	33	21

оптимальных моментов времени для включения управляющих воздействий (перемешивание, рыхления), обеспечивающих минимальное время промораживания слоя.

В Таблице №3 представлены значения временных интервалов, необходимых для выхода изотермы минус 0,5°C на нижнюю границу слоя. Суммируя соответствующие значения таблиц №2 и №3, мы получим значения длительности полного промерзания слоя влажного материала с учетом рыхления (перемешивания), которые

Таблица 3. Время дополнительного промораживания после перемешивания (час)
Table 3. Additional freezing time after mixing (hours)

Толщина слоя (м)	Температура среды, °C			
	-10	-20	-30	-40
0,1	5,2	15,7	12,1	2,2
0,2	13,2	13,8	11,1	8,9
0,3	22,2	15,2	17,7	19,5
0,4	26,7	32,5	31,4	34,4

Таблица 4. Полное время промораживания слоя с перемешиванием

Table 4. Total freezing time with stirring

Толщина слоя (м)	Температура среды, °C			
	-10	-20	-30	-40
0,1	15,2	20,7	15,1	5,2
0,2	46,2	27,8	21,1	15,9
0,3	92,2	49,2	37,7	32,5
0,4	147,7	89,5	64,4	55,4

представлены в Таблице №4. Их сравнение с данными промерзания слоев различной толщины, представленными в Таблице №1, позволяет говорить об эффективности выбора и достаточности применения однократного управляющего воздействия.

Выводы. Построена модель тепломассопереноса в промерзающем слое горной породы с использованием уравнения фазового равновесия поровой влаги.

Разработан и представлен алгоритм решения задач ускоренного промораживания слоя горной породы с использованием управляющего воздействия (перемешивание, рыхление), отличающийся сокращением времени промораживания в два-три раза по сравнению с процессом естественного промораживания, обеспечивающий сохранение сыпучих свойств материала.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема, № 122011800086-1 ЕГИСУ НИОКТР) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маталасов С. Ф. Борьба со смерзаемостью

металлургического сырья при перевозке по железным дорогам М : Metallургия, 1974. 248 с.

2. Батраков И. И. [и др.] Перевозка смерзающихся грузов. Под ред. Ю.А. Носкова. М. : Транспорт, 1988.

3. Shmeltser E. O. Prevention of coal freezing by means of acetates // Coke and Chemistry. 2016. Vol. 59. № 4. Pp. 132–136.

4. Коваленко М. В., Соловьев В. А. Разработка нового способа борьбы со смерзанием угля в полувагонах в зимний период времени / Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: научн.-тех. конференция студентов и аспирантов, 1-15 апреля 2016 г. Комсомольск-на-Амуре :

ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. С. 259–260.

5. Секачев Д. Е., Рахутин М. Г. Проблемы восстановления сыпучести угольного топлива в осенне-весенний и зимний периоды в угольных терминалах. // Уголь. 2019. № 11. С. 54–57.

6. Гушин А. А., Ермаков А. Ю., Мирошников А. М. Аналитический обзор реагентов для предотвращения смерзания угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 5. С. 182–191.

7. Ощепков И. А., Худоносова З. А. Химическая обработка вагонов и угля против примерзания, смерзания и выдувания при перевозках // XV Международная научно-практическая конференция «Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности», 8–11 октября 2013 г. Кемерово. 2013. С. 19–23.

8. Проблемы смерзания и липкости минерального сырья. Материалы российского заочного семинара. Вып. 1. Якутск : Якутский научный центр СО РАН. 1994.

9. Сармурзин Г. [и др.] Основные технологические решения по эффективной разгрузке смерзшего груза из железнодорожных полувагонов // Наука и техника Казахстана. 2017. № 3–4. С. 95–105. ISSN 1680-9165.

10. Shmeltser E. O., Korner M. V., Lyalyuk V. P. Prevention of coal raw materials freezing by means of organosilicon compounds // International Trends in Science and Technology. 2020. № 11. Pp. 2–5.

11. Иванов В. М., Радовитский И. В. Предотвращение потерь и смерзаемости углей при транспортировании. М. : Недра, 1979.

12. Кожевников Н. Н., Попов В. И. Прогнозирование процессов промерзания в сыпучих материалах при железнодорожных перевозках. Новосибирск : Наука, 1978.

13. Лепнев М. И., Северинов Е. П. Грузы и мороз. М. : Транспорт, 1988.

14. Энциклопедия машиностроения. XXL /оборудование, материаловедение, механика/. Электрон. ресурс. <https://mash-xxl.info/info/220713/?ysclid=m1hi2zewmm326634830>.

15. Попов В. И., Курилко А. С. Приближенный метод решения задач тепломассопереноса при замерзании влаги в горных породах криолитозоны // ГИАБ. 2018. № 12. С. 57–64. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-57-64.

16. Беллман Р. Динамическое программирование. ил., 1960. 401 с.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0

Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Попов Владимир Иванович, канд. техн. наук, с.н.с., Институт горного дела Севера имени Н. В. Черского СО РАН (677018, Россия, г. Якутск. пр Ленина 43), e-mail: popov.gtf@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Попов Владимир Иванович – Научный менеджмент, анализ данных, разработка алгоритма, оформление текста и графической информации, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

OPTIMIZATION OF FREEZING AND LOOSE PROCESSES OF THE MATERIAL LAYER TO MAINTAIN FLOWABILITY AT NEGATIVE TEMPERATURES

Vladimir I. Popov

Chersky Institute of Mining, of the North SB RAS

* for correspondence: popov.gtf@mail.ru



Article info

Received:

10 October 2024

Accepted for publication:

22 April 2025

Accepted:

30 April 2025

Published:

11 June 2025

Keywords: freezing of bulk material, digital twin, optimization; mixing, control action.

Abstract.

In the zone of action of negative temperatures of the cooling medium, during transportation and storage of wet bulk materials, its partial or complete freezing occurs, depending on the duration of exposure to negative temperatures. In this case, it becomes necessary to take various preventive measures to ensure the possibility of preserving the bulk properties of the materials used under storage and transportation conditions. Currently, there is a fairly wide range of various measures, including the use of various salts that reduce the freezing temperature of the cargo, hydrophobic additives that replace direct contact between wetted particles of the cargo with oil layers, as well as the use of reagents that have a higher degree of adhesion to particles of bulk cargo and replace contact with them of water films. The extreme and difficult to achieve measure is the complete elimination of the freezing component - water - from the systems under consideration. The practical analogue of this method is freezing a layer of wet material with subsequent loosening (mixing) as the most accessible and simple in technical implementation. A mathematical model of the process of freezing a layer of wet bulk material has been developed within the framework of the dynamic programming method. The procedure of loosening (mixing) the material layer and the moment of its application have been adopted as a control action. A program has been developed - a digital twin of the process of freezing a layer of material, with the help of which the optimal moment of application of the loosening (mixing) procedure has been determined for cargo layers of different thicknesses, at different values of the temperature of the cooling medium. This approach allows to significantly, by 2-3 times, reduce the time of preliminary freezing of cargo in preparation for transportation or storage compared to the natural course of the freezing process (without mixing).

For citation: Popov V.I. Optimization of freezing and loose processes of the material layer to maintain flowability at negative temperatures. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 2(168):80-85. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-2-80-85, EDN: IPFSDI

REFERENCES

1. Matalasov S.F. Bor'ba so smerzayemost'yu metallurgicheskogo poberezh'ya pri perezovke po zheleznyim dorogam. M.: Metallurgiya; 1974.
2. Batrakov I.I. [et al.] Perekovka smerzshikhysya gruzov. Pod red. Yu.A. Noskova. M.: Transport; 1988.
3. Shmel'tser Ye.O. Predotvrashcheniye zamerzaniya uglya s pomoshch'yu atsetatov. *Koks i khimiya*. 2016; 59(4):132–136.
4. Kovalenko M.V., Solov'yev V.A. Razrabotka novogo puti bor'by so smerzaniyem uglya v poluvagonakh v zimniy period vremeni. *Nauchno-tehnicheskoye tvorchestvo aspirantov i studentov: nauchn.-tekh. konferentsiya studentov i aspirantov*. 1-15 aprelya 2016 g. Komsomol'sk-na-Amure: FGBOUVO «KnAGTU»; 2016.
5. Sekachev D.Ye., Rakhutin M.G. Problemy vosstanovleniya sypuchesti ugol'nogo topliva v osenne-vesenniye i zimniye periody na yuzhnykh terminalakh. *Ugol'*. 2019; 11:54–57.
6. Gushchin A.A., Yermakov A.Yu., Miroshnikov A.M. Analiticheskii obzor reagentov dlyapredotvrashcheniya smerzaniya ugley. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2015; 5:182–191.
7. Oshchepkov I.A., Khudonosova Z.A. Khimicheskaya obrabotka metallov i ugley protiv primerzaniya, smerzaniya i vyduvaniya pri perezovkakh. *XVMezhdunarodnayanauchno-prakticheskayakonferentsiya «Energeticheskayabezopasnost' Rossii. Novyyepodkhodykrazvitiyuugol'noypromyshlennosti»*. 8-11 oktyabrya 2013 g. Kemerovo, 2013
8. Problemy smerzaniya i lipkosti mineral'nogo syr'ya. *Materialy rossiyskogo zaochnogoseminara*. Vyp. 1. Yakutsk: Yakutskiy nauchnyy tsentr SO RAN; 1994.
9. Sarmurzin G. [et al.] Osnovnyye tekhnologicheskiye resheniya po effektivnoy razgruzke smerzshogo gruzha iz zhnleznodorozhnykh poluvagonov. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2017; 3–4:95–105. ISSN 1680-9165.
10. Shmel'tser Ye. O., Kormer M. V., Lyalyuk V. P. Predotvrashcheniye zamerzaniya ugol'nogo syr'ya s pomoshch'yu kremniyorganicheskikh soyedineniy. *Mezhdunarodnyyetendentsii v naukeitekhnikе*. 2020; 11:2–5.
11. Ivanov V.M., Radovitskiy I.V. Predotvrashcheniye poter' i smerzayemosti uglya pri transportirovke. Moskva: Nedra; 1979.
12. Kozhevnikov N.N., Popov V.I. Prognozirovaniye protsessov promerzaniya v sypuchikh materialakh pri zheleznodorozhnykh perezovkakh. Novosibirsk: Nauka; 1978.
13. Lepnev M.I., Severinov Ye.P. Gruzy i moroz. Moskva: Transport; 1988.
14. Entsiklopediya mashinostroyeniya. XXL /oborudovaniye, materialovedeniye ,mekhanika/. Elektron. resurs. <https://mash-xxl.info/info/220713/?ysclid=m1hi2zewmm326634830>.
15. Popov V.I., Kurilko A.S. Priblijennii metod resheniya zadachi teplomassoperenosa pri zamerzanii vlagi v gornykh porodakh kriolitozony. *GIAB*. 2018; 12:57–64. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12-0-57-64.
16. Bellman R. Dinamicheskoye programmirovaniye. IL., 1960.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Vladimir I. Popov, C. Sc. in Engineering, Institute of Mining of the North named after N. V. Chersky SB RAS (677018, Russia, Yakutsk, Lenin Ave. 43), e-mail: popov.gtf@mail.ru

Contribution of the authors:

Vladimir I. Popov – Scientific management, data analysis, algorithm development, text and graphic design, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

