

УДК 656.614.3.073.43(045)

ANALYSIS OF PREVENTIVE MEASURES AGAINST CONGEALING OF BULK CARGO DURING DISCHARGING IN WINTER PERIOD**АНАЛИЗ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕР ПРИ РАЗГРУЗКЕ-СМЕРЗАЮЩИХСЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД**A.N. Volkov, *assistant*А.Н. Волков, *ассистент**Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

The paper discusses and analyzes the preventive measures used in the process of maritime transportation to prevent freezing of bulk cargo in order to optimize unloading by factors of safety, performance and efficiency.

Keywords: frozen cargo, unloading, moisture content, frozen ground.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

К смерзающим относятся любые перевозимые насыпью грузы, которые при температурах наружного воздуха ниже 0°C теряют свои обычные свойства сыпучести вследствие смерзания частиц груза между собой и примерзания их к днищу и бортам транспортного средства.

Процессу разгрузки предшествует ряд транспортно-эксплуатационных факторов. Например, если уголь грузится при теплой погоде, набирает или удерживает влагу в процессе транспортировки, спрессовывается от качки и прибывает в регион, где в это время уже морозы, то в результате получаем «монолит», который выгрузить обычными средствами невозможно.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Эта проблема решается двумя путями: предотвращением смерзаемости груза, либо восстановлением его сыпучести.

К числу традиционных профилактических мер, предохраняющих грузы от смерзания относятся:

- предварительная сушка насыпных грузов до безопасной влажности;
- промораживание увлажненных грузов до их погрузки;
- равномерное обрызгивание их массы, палуб и стенок трюмов каменно-угольными и минеральными маслами, профилактическими жидкостями

(ниогрином, исеверином, растворами хлористого кальция и поваренной соли);

- пересыпка груза негашеной известью, древесными опилками.

Фактическая влажность в естественном состоянии большинства сыпучих материалов превышает нормативную. При предъявлении к перевозке таких грузов отправитель должен принять меры к предварительному (до погрузки) уменьшению их влажности до безопасных в отношении смерзания пределов [1].

В условиях устойчивых морозов эффективной мерой предохранения насыпных грузов от смерзания в пути следования является предварительное (до погрузки) промораживание груза путем многократного пересыпания (перелопачивания) его массы экскаватором, скрепером, грейферным краном или другим механизмом. При этом необходимо, чтобы частицы груза обветривались наружным воздухом. Промораживание может считаться законченным после достижения в середине слоя пересыпаемого груза температуры минус 3°C и ниже [1].

Негашеная известь, применяемая в качестве профилактического средства против смерзания грузов, должна иметь размеры частиц не более и содержать не менее 50% активной окиси кальция CaO и не более 9% кремнезема SiO₂ (ГОСТ 9179-77). Количество негашеной извести, необходимое для предохранения насыпного груза от смерзания, определяется местными органами службы контроля качества продукции и отделами технического контроля организаций в зависимости от содержания влаги в грузе и с учетом практики перевозок такого груза [2].

Также применяют технологию пересыпания груза с поваренной солью и хлористым кальцием, при этом процесс производится аналогично перемешиванию негашеной известью. При температуре наружного воздуха ниже минус 20°C поваренная соль не применяется.

При перекладке груза древесными опилками необходимо, чтобы они были сухими.

При этом выбранные к применению средства профилактики не должны отрицательно влиять на транспортное средство, а также на качество и свойства перевозимого груза, предусмотренные соответствующими ГОСТами или техническими условиями на продукцию [2].

При перевозках грузов на дальние расстояния в условиях низких температур окружающего воздуха, меняющихся климатических и метеорологических условиях (особенно в переходные периоды года) грузополучатели оснащают свои пункты выгрузки смерзающихся грузов средствами разогрева или механического рыхления для восстановления сыпучести таких грузов.

К сожалению, весь арсенал средств рыхления навалочных грузов либо малоэффективен, либо имеет низкую производительность [1, 2].

Всвязи с общей сложившейся ситуацией за многие годы и запросом терминалов по переработке сыпучих грузов проблема повышения скорости разгрузочных операций и снижения их себестоимости и повышения безопасности постоянно требует инноваций и их дальнейшего развития.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью исследования статьи является оценка эффективности использования технологической схемы разгрузки смерзшегося сыпучего груза.

Повысить производительность разгрузочных работ на балкерах в условиях низких температур.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Сначала рассмотрим возможное изменение состояния влажного груза в процессе транспортировки на примере угля - одного из грузов, объемы перевозок которого постоянно занимают одно из ведущих мест.

К проблеме сорбции-десорбции паров воды углем обращались систематически и постоянно [3—6]. В области малой относительной влажности воздуха, примерно до $\varphi = 0,4$, пары воды незначительно адсорбируются углем, зато в интервале от 0,4 до 0,7 наблюдается резкий рост сорбционной активности угля. При этом изотермы сорбции — десорбции угля, как правило, образуют гистерезис и имеют S-образный характер без наличия сингулярных точек.

При построении зависимости равновесных влагосодержаний различных сортов угля от приведенной ширины эквивалентной поры $H_0 = H/H_{0s}$, где H_{0s} - ширина эквивалентной поры при $\varphi = 100\%$ и $T = 273,15^\circ\text{K}$, установлено, что все точки образуют единую кривую. Это значит, что для исследованных сортов угля соблюдаются температурная и сортная инвариантности, т.е. можно построить обобщенную характеристическую кривую угля.

Для расчета приведенного влагосодержания материала необходимо знать его максимальное гигроскопическое влагосодержание U_{0s} . Эта величина может быть определена графической экстраполяцией индивидуальной характеристической кривой $U = f(H)$, либо расчетом по имеющимся экспериментальным точкам. Найденное вторым способом для базового сорта угля U_{0s} равно 0,327 кг влаги / кг сухой массы [7].

Обобщенная характеристическая кривая влагосодержания угля описана аналитически однопараметрическим уравнением

$$W = \alpha \cdot \exp(b \cdot H_0^M) + c \cdot \exp(d \cdot H_0^N), \quad (1)$$

где H_0 - приведенная ширина эквивалентной поры.

Средняя квадратическая погрешность ($\sigma_{\text{кв}}$) аппроксимации экспериментальных данных уравнением (1) составляет 5%, что соответствует точности исходных данных. Значения коэффициентов однопараметрического уравнения (1) для угля приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов однопараметрического уравнения приведенного равновесного влагосодержания

Материал	α	b	c	d	N	M
Уголь	0,001	6,699	0,003	-9,612	0,897	0,16

Программы автоматической аппроксимации уравнений и их использование (обобщение, аналитическое описание и расчет равновесных влагосодержаний) [8, 9] предусматривают аппроксимацию двухпараметрическим уравнением. При этом в качестве опорных значений использованы данные, рассчитанные из уравнения характеристической кривой. Опорные данные описаны с высокой точностью ($\sigma_{\text{кв}} \geq 0,77\%$).

$$W = \varphi \cdot \exp \left[\sum_1^m \sum_1^n (\alpha_{ij} \Theta^j \varphi^i) \right], \quad (2)$$

где $\Theta = T_0/T - 1$ — приведенная температура; T_0 и T — температура приведения и текущая, °К.

Значения коэффициентов $\alpha_{i,j}$ для десорбции угля приведены ниже

$$\begin{aligned} \alpha_{0,0} &= 0,4213025 \times 10^0, & \alpha_{1,0} &= 0,2126248 \times 10^1, \\ \alpha_{0,1} &= 0,1530357 \times 10^2, & \alpha_{1,1} &= -0,1870246 \times 10^3, \\ \alpha_{0,2} &= -0,5244350 \times 10^2, & \alpha_{1,2} &= 0,4643408 \times 10^3, \\ \alpha_{0,3} &= 0,1362825 \times 10^3, & \alpha_{1,3} &= -0,3989329 \times 10^3, \\ \alpha_{0,4} &= 0,9587607 \times 10^2, & \alpha_{1,4} &= 0,4765755 \times 10^2, \\ \alpha_{2,0} &= -0,5970079 \times 10^2, & \alpha_{3,0} &= 0,3021521 \times 10^3, \\ \alpha_{2,1} &= 0,9577466 \times 10^3, & \alpha_{3,1} &= -0,2087533 \times 10^4, \\ \alpha_{2,2} &= -0,1125808 \times 10^4, & \alpha_{3,2} &= 0,6019028 \times 10^3, \\ \alpha_{2,3} &= 0,1472904 \times 10^3, & \alpha_{3,3} &= 0,1289324 \times 10^3, \\ \alpha_{4,0} &= -0,7184314 \times 10^3, & \alpha_{5,0} &= 0,9000959 \times 10^3, \\ \alpha_{4,1} &= 0,1550062 \times 10^4, & \alpha_{5,1} &= 0,8936331 \times 10^3, \\ \alpha_{4,2} &= 0,6490857 \times 10^3, & \alpha_{5,2} &= -0,5364355 \times 10^3, \\ \alpha_{6,0} &= -0,5379550 \times 10^3, & \alpha_{7,0} &= 0,1472797 \times 10^3, \\ \alpha_{6,1} &= -0,1854844 \times 10^4, & \alpha_{7,1} &= 0,7128628 \times 10^3. \end{aligned}$$

Таким образом, пользуясь уравнениями влагосодержания материалов (1) и (2), можно определять равновесное состояние влагосодержания угля и избыточное количество воды и влаги, образующееся на поверхностях частичек груза.

Несмотря на объёмные расчёты и вычисления, практически, смерзаемость частичек груза происходит даже при влагосодержании ниже равновесного состояния материала.

Исходя из этого, обратимся к теории и свойствам мерзлого грунта, который представляет собой совокупность органоминеральных частиц с включениями незамерзшей воды (растворов) и газов, связанных льдом. В обычных условиях, особенно при T , близких к 0°C , лед начинает оттаивать при любом малом повышении P или T , в результате чего мерзлый грунт теряет устойчивость. Прочность мерзлого грунта, сцепление его частиц, обеспечивается в основном ледяными связями [10]. Остальными связями в первом приближении можно пренебречь и расценивать разжижение ледяных связей с последующим расплыванием грунта как пластическое разрушение, а $j_{\text{пл}}$ — как его предельную деформацию, при которой упрочнение меняется на разупрочнение. При $j > j_{\text{пл}}$ грунт переходит в текучее состояние, в котором частицы утрачивают сцепление,

сплошность тела поддерживается только за счет внутреннего трения (вязкости), процесс завершается распадом.

Существует концепция о двух основных механизмах разрушения мерзлого грунта: медленном-пластическом, развивающемся вблизи точки плавления, и хрупком [11].

Для полного описания поведения нагруженного твердого тела необходимо также знать зависимость деформации от времени. Взяв в

$$\tau_{\text{дл}} = \tau_0 \cdot \exp \left[\left(1 - P/P_{\text{м.с.}} \right) / j_{\text{хр}} \right], \quad (3)$$

производную $j_{\text{хр}}$ по $\tau_{\text{дл}}$, находим формулу скорости деформации

$$d_i / d_j = - \left(1 - P/P_{\text{м.с.}} \right) / \tau \left[\ln(\tau_{\text{дл}} / \tau_0) \right]^2, \quad (4)$$

Проинтегрировав в формуле (4) j в пределах от 0 до $j_{\text{хр}}$, а τ – от τ_0 до $\tau_{\text{дл}}$, после преобразований получим искомое выражение временной зависимости деформации (средней по всему объему) для хрупкоразрушающегося тела:

$$j / j_{\text{хр}} = \ln(\tau / \tau_0) / \ln(\tau_{\text{дл}} / \tau_0). \quad (5)$$

Отношение конечной разности $P_{\text{м.с.}} - P = \Delta P$ к $P_{\text{м.с.}}$ в формуле (3) отвечает условию скачкообразного изменения внутреннего давления от величины внешнего P до максимума $P_{\text{м.с.}}$. При пластическом разрушении внутреннее давление последовательно проходит весь спектр значений: от внешнего P до максимума $P_{\text{м.пл}}$, величина которого в этом случае определяется из уравнения Клапейрона–Клаузиуса:

$$P_{\text{м.пл}} = Q_{\text{пл}} \cdot t / [T_0 (V_{\text{тв}} - V_{\text{ж}})], \quad (6)$$

Таким образом, долговечность изменяется от $\tau_{\text{дл}}$ до τ_0 . Поэтому при пластическом разрушении в (4) вместо $\Delta P/P_{\text{м.с.}}$ надо брать интеграл dP/P в пределах от P до $P_{\text{м.пл}}$, а вместо $\tau_0/\tau_{\text{дл}}$ – интеграл dt/τ в пределах от $\tau_{\text{дл}}$ до τ_0 . После этих преобразований формулы (3) получается выражение длительной прочности пластичного тела:

$$P = P_{\text{м.пл}} (\tau_0 / \tau_{\text{дл}})^{j_{\text{пл}}}, \quad (7)$$

Формула (7) по структуре аналогична известной формуле С.С. Вялова:

$$P = A / \tau_{\text{дл}}^a, \quad (8)$$

где A , a – эмпирические коэффициенты.

Основываясь на расчётные формулы (2—8) и работу Лобанова В.А о моделировании ледяного покрова и его взаимодействий с телами и средами в задачах с конечноэлементной постановкой [12] были выведены следующие характеристики материалов представленные в табл. 2.

Таблица 2. Физические характеристики льда и воды

Параметр	Материал	
	Лёд	Вода
	Упругоэластический материал с изотропным упрочнением, критерием текучести Мизеса и критериями разрушения	Вязкопластический материал с нулевыми компонентами девиатора напряжений
Плотность, кг/м ³	910,0	1000,0
Модуль Юнга, Па	$5,00 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^9$
Модуль сдвига, Па	$1,87 \cdot 10^9$	
Модуль объемного сжатия, Па	$5,20 \cdot 10^9$	
Коэффициент Пуассона	0,34	0,50
Предел текучести, Па	$2,50 \cdot 10^6$	
Модуль упрочнения, Па	$0,65 \cdot 10^9$	
Предел прочности на растяжение, Па	$1,20 \cdot 10^6$	
Деформация разрушения	0,12	
Динамическая вязкость, Па·с		0,001
Кинематическая вязкость, м ² /с		$1,0 \cdot 10^{-6}$

Исходя из полученных результатов [3, 7, 11, 12], основываясь на частые запросы перегрузочных терминалов о необходимости решения проблем, возникающих в процессе грузовых операций с смерзшимися грузами по старым технологиям и большими финансовыми затратами на устранение трудностей, возникает потребность в поиске новых решений и построения технологий выгрузки смерзшихся грузов.

Одним из таких решений для смерзшегося «монолита», является система подрыва смерзшегося груза газом CO₂ для разрыва частичек груза, чтобы общая масса замерзшего груза вернулась в исходное состояние и приобрела свойства сыпучести [13].

Система разрушения смерзшегося груза построена таким образом, чтобы сформировавшийся мгновенно мощный подрыв газом (углекислым), при его адиабатическом расширении при изменении агрегатного состояния из жидкого в газообразное, приводил к разрушению ледяных связей смерзшейся массы груза «монолита» на отдельные части.

Технология подрыва заключается в следующем: в заранее просверленные отверстия в грузе устанавливаются трубки с зарядами, затем в активирующей головке трубки производят импульсное замыкание, после чего нагреватель из-

меняет агрегатное состояние CO₂ из жидкого в газообразное, увеличиваясь при этом в объеме в 600 раз. Мгновенное изменение внутреннего давления приводит к разрыву мембраны, которая лопаается и дает возможность резкому освобождению газа из трубки через головку - распылитель в общую массу груза. Весь процесс занимает не более 1 секунды.

Таблица 3. Типы подрывных трубок и их характеристики

Тип трубы	B20	B37	F57	F57-L	C74
Диаметр, мм	45	34	51	51	64
Длина, мм	686	1,118	1,246	1,753	1,093
Вес, кг	5,45	8,18	12,73	20	16,82
Заряд CO ₂ , кг	0,29	0,60	0,88	1,25	1,25
Рабочее давление, т/дюйм ²	12 15	12 15	8 12	15 17,5 12 15	8 12
Рабочее давление, кг/см ²	1900 2360	1900 2360	1260 1900	2360 2760 1900 2360	1260 1900
Толщина мембраны, мм	2,8 3,6	2,8 3,6	2,4 3,6	4,4 5,2 3,6 4,4	3,2 4,8
Тип нагревателя	D45 D62,5	D62,5 D77,5	D50 D77,5	D100 D115 D115 D115	D120 D145
Диаметр отверстия, мм		51	57	57	76

Технология подрыва углекислым газом является новой и требует сравнительного анализа с уже существующими мероприятиями по предотвращению смерзаемости груза.

В таблице 4 представлены результаты экспертной оценки по возможности использования технологических методов проведения профилактических мероприятий, применительно к морскому судну, в зависимости от эксплуатационных факторов.

Факторы, влияющие на эффективность применения и использования технологического профилактического мероприятия, выстроены по ранжиру по мере нарастания их значимости. Экспертная оценка влияния факторов произведена по условиям «1» - «2», присваивая «1» фактору, несущим негативное условие, благоприятствующее выбору мероприятия и «2» - имеющему положительное или нейтральное воздействие на него.

Таблица 4. Результаты экспертной оценки по использованию методов и средств разрыхления смерзаемого насыпного груза при выгрузке балкера

№ п/п	Технологические аспекты	Факторы								Сумма баллов
		Безопасность	Время	Финансовые затраты	Многократность использования	Предварительная подготовка	Износ грузовых помещений	Неоднородность груза	Остаточные отходы	
1	Сушка	1	1	1	2	1	2	2	2	12
2	Промораживание	2	1	1	2	1	2	2	2	13
3	Увлажнение	1	2	2	2	2	1	2	1	13
4	Пересыпка известью	1	1	1	1	1	1	1	1	8
5	Пересыпка опилками	2	1	1	1	1	2	1	1	10
Продолжение таблицы 4										
6	Пересыпка поваренной солью	1	1	1	1	1	1	1	1	8
7	Перемешивание маслами	1	1	1	1	1	1	1	1	8
8	Рыхление	1	1	2	2	1	1	2	2	12
9	Подрыв	1	2	2	2	2	1	2	2	14

Метод перемешивания груза маслами приводит к обволакиванию частичек груза масляной пленкой, вследствие чего теряются устойчивые молекулярные связи, приводящие к смерзанию груза в «монолит». Смерзаемость груза при таком методе происходит при значительно низких температурах. Однако данный метод требует длительной подготовки как технической, так и временной; приводит к перемешиванию груза с вторичными продуктами, что влечет за собой возможное изменение физических и химических свойств груза. После такого мероприятия на судне следует организовывать тщательную чистку трюмов и отсеков от вторичных продуктов. При очередной перевозке навалочного груза вторичное сырье не может быть использовано дважды.

Пересыпание груза опилками, поваренной солью или перемешивание с известью влечет за собой послойное формирование штабелей. Смерзаемость груза практически отсутствует лишь в тех прослойках, на которых происходило пересыпание или перемешивание. Выгрузка при таких профилактических мерах требует дополнительных работ по рыхлению. После таких мероприятий на судне необходимо организовывать чистку трюмов и отсеков от абсорбирующих веществ и проверять грузовые помещения на наличие повреждений.

В случаях, когда используется метод сушки, промораживания или увлажнения, необходимо учитывать, что вероятность смерзания груза в «монолит» велика, если во время транспортировки не поддерживать и не контролировать исходное состояние груза. В зависимости от свойств груза, они не всегда эф-

фективны и вообще могут быть не применимы к отдельным видам груза.

Когда грузоотправители не предпринимают никаких предварительных мероприятий против смерзания груза, то на терминалах выгрузки используют метод рыхления, который является очень продуктивным в зависимости от технологии и алгоритма проведения работ.

Такие мероприятия как сушка, промораживание, рыхление и увлажнение исключают такие факторы как дополнительная зачистка грузовых помещений после выгрузки, систематическая закупка масел и абсорбирующих веществ. Многократность использования таких методов является одним из основных преимуществ.

По результатам проведенной оценки видно, что наибольшее количество баллов получило мероприятие по проведению подрыва смерзшегося груза. Однако оно не является решающим, а скорее вынужденным. В случаях, когда не было возможности или не были проведены предварительные мероприятия для предотвращения смерзаемости груза, а также, когда терминал, на котором выгружается судно, не имеет возможности для проведения рыхления «монолита», можно использовать данный метод.

Все описанные мероприятия, проводимые до или после погрузки груза на борт судна, требуют особого подхода и соблюдения со стороны безопасности. Они являются дополнительными мерами к грузовому процессу и поэтому к безопасности процесса должно быть повышенное внимание.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

В настоящее время перегрузочные терминалы используют все традиционные профилактические мероприятия по предотвращению груза от смерзания или восстановления его сыпучести в зависимости от требований грузополучателя, однако при различных условиях они могут не давать ожидаемого результата.

В исключительных случаях можно использовать технологию подрыва углекислым газом, которая удовлетворяет практически всем факторам, влияющим на качество груза.

После проведения экспериментов и получения конкретных результатов в судовых условиях будет сделан вывод о целесообразности использования технологии подрыва «монолита».

Дальнейшие исследования планируется направить на разработку стратегии безопасной разгрузки смерзаемых грузов и алгоритма его оптимальной разгрузки с учётом этапов погрузки и транспортировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила перевозок смерзающихся грузов на железнодорожном транспорте: Минюст РФ 12 мая 1999 г. N 1786.
2. Носков Ю.А. Перевозка смерзающихся грузов / Ю.А.Носков – Транспорт, 1988. – 180с.

3. Дубинин М.М. Адсорбция паров воды и микропористые структуры углеродных адсорбентов / М.М. Дубинин: Изв. АН СССР. Химия, 1981. - №1 — С. 9-23.
4. Дубинин М.М., Заверина Е.Д. Адсорбция водяных паров и структура активных углей /М.М. Дубинин: Докл. АН СССР. - 1947. - 11. №7-С. 715-718.
5. Кисарев В.М. Изотерма адсорбции паров воды на углеродистых сорбентах /В.М. Кисарев: Журн. физ. Химии. - 1984. 58. - С. 1023-1025.
6. Никитина Л.М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. / Л.М. Никитина. - М.: Энергия, 1968. - 478 с.
7. Загоруйко В.А. Термодинамика и теплофизика влажных материалов / В.А. Загоруйко, А.А. Голиков, А.Г. Слынько — Наукова думка: Судоходство, 1995.
8. Слынько А.Г. Методы прогнозирования, аналитического описания и расчёта теплофизических свойств веществ и материалов / А.Г. Слынько - Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Одесса, изд-во ОИИМФа, 1989. - 19с.
9. Слынько Н.А. Методы прогнозирования и расчёта равновесных влагосодержаний пищевых продуктов / Н.А. Слынько - Автореф. дисс. канд. техн. наук. - Одесса, изд-во ОИИМФа, 1991. - 16с.
10. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. / С.С. Вялов - М., Высш. шк., 1978, 448 с.
11. Коновалов А.А. Параметры фазового равновесия мерзлых грунтов / А.А. Коновалов : Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли. Новосибирск, Наука, 1997, с. 234–240.
12. Лобанов В.А. Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой. Дифференциальные уравнения и процессы управления / В.А. Лобанов В.А. - Электронный журнал No4, 2008. , рег. NoП2375 от 07.03.97 ISSN 1817 – 2172.
13. Cardox Global Resource Pte Ltd.