

SEA TRANSPORTATION OF DIRECT REDUCED IRON IN BULK

A. N. Sitov¹, V. A. Malovechko², A. E. Slitsan¹

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — Marine Cargo Bureau, St. Petersburg, Russian Federation

The International code of sea transportation of bulk cargoes for definition of a class of danger of bulk cargoes does not take a number of the interconnected factors (size of a congestion and dispersion of a material, temperature, humidity and others), that leads to a biased assessment of degree of danger of freight into account. Dangerous processes of self-heating with transition to self-ignition, allocation of dangerous gases and oxygen absorption can happen consistently or in parallel. The code does not contain requirements and the techniques, allowing to determine criteria and parameters of the sizes of a congestion of a material by size, conditions of environment for danger emergence. For definition of a class of danger of a bulk cargo it is necessary to investigate its heatphysical characteristics and kinetic parameters of process of self-ignition. Data on heatphysical characteristics of materials have to be provided by the consignor without fail with the instruction them in the Material Safety Data Sheet. Heatphysical models of spontaneous emergence of burning, on the basis of which methods of determination of kinetic parameters of process of self-ignition are developed and approved in practice, are investigated. The mathematical description of the heatphysical model describing process of thermal self-ignition is given. Skilled values of kinetic parameters of process of self-ignition are presented and the forecast for values of fireproof technological parameters of warehousing in ports and transportations on vessels is executed. Practical recommendations for change the regulations of bulk cargo transportation on the example of direct reduced iron are given. It is offered to limit height of a stack of bulk cargo depending on duration of transportation and temperatures. Change of technological rules in transit and storage of cargoes will allow to increase fire safety of transport operations considerably.

Keywords: dangerous cargo, bulk cargo, self-ignition, technology of transportation, safety.

For citation:

Sitov, Alexandr N., Vladimir A. Malovechko, and Andrey E. Slitsan. "Sea transportation of direct reduced iron in bulk." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1162–1178. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1162-1178.

УДК 656.613.1

МОРСКАЯ ПЕРЕВОЗКА ЖЕЛЕЗА ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАВАЛОМ

А. Н. Ситов¹, В. А. Маловечко², А. Е. Слищан¹

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Морское грузовое бюро», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов для определения класса их опасности не принимает во внимание ряд взаимосвязанных факторов (размер скопления и дисперсность материала, температуру, влажность и др.), что приводит к необъективной оценке степени опасности груза. Опасные процессы самонагрева с переходом к самовозгоранию, выделение опасных газов и поглощение кислорода для рассматриваемых грузов может происходить либо последовательно, либо параллельно. Кодекс не содержит требований и методик, позволяющих определять критерии и параметры размеров скопления материала по величине, условий окружающей среды для возникновения опасности. Для определения класса опасности навалочного груза необходимо исследовать его теплофизические характеристики и кинетические параметры процесса самовозгорания. Сведения о теплофизических характеристиках материалов должны предоставляться грузоотправителем в обязательном порядке с указанием их в паспорте безопасности химической продукции. Исследованы теплофизические модели самопроизвольного возникновения горения, на основе которых разработаны и апробированы на практике методы определения кинетических параметров процесса самовозгорания. Дано математическое описание теплофизической модели, описы-

вающей процесс теплового самовозгорания. Представлены опытные значения кинетических параметров процесса самовозгорания и выполнен прогноз значений пожаробезопасных технологических параметров складирования в портах и перевозки на судах. Предложены практические рекомендации по изменению нормативных актов, регламентирующих перевозку навалочных грузов на примере железа прямого восстановления. Предлагается ограничить высоту перевозимого навалом штабеля груза в зависимости от длительности перевозки и температуры. Отмечается, что изменение технологических правил при перевозке и хранении грузов позволит значительно повысить пожаробезопасность транспортных операций.

Ключевые слова: опасный груз, навалочный груз, самовозгорание, технология перевозки, безопасность.

Для цитирования:

Ситов А. Н. Морская перевозка железа прямого восстановления навалом / А. Н. Ситов, В. А. Маловечко, А. Е. Слициан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1162–1178. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1162-1178.

Введение (Introduction)

Международная ассоциация владельцев сухогрузных судов (далее — ИНТЕРКАРГО) уделяет значительное внимание вопросам безопасности перевозки навалочных грузов (НГ) с особыми условиями. В качестве основных причин аварий, происходящих с судами, являются предоставление недостоверных сведений о свойствах груза, а также нарушение технологических требований к условиям погрузки, перевозки и хранения [1].

В целях повышения безопасности перевозок НГ Международная морская организация (ИМО) приняла ряд поправок к международным кодексам, в том числе к Международному кодексу морской перевозки навалочных грузов (далее — МКМПНГ) [2], [3], которые, по-прежнему, не являются исчерпывающими для грузов, подверженных самовозгоранию и выделению опасных газов при взаимодействии с водой. В МКМПНГ приведены двадцать две индивидуальных описи для грузов класса ООН МНВ. Большинство этих грузов не отнесены к подклассам 4.2 (вещества, способные к самовозгоранию) или 4.3 (вещества, выделяющие легко воспламеняющиеся газы при соприкосновении с водой), но проявляют опасные свойства в силу своих физико-химических характеристик при определенных взаимосвязанных условиях, к которым относятся:

- размер скопления материала и его геометрическая форма;
- дисперсность материала;
- температура и влажность окружающей среды;
- температура и влажность материала, наличие в нем примесей (жир, масло, нефтепродукты и др.);
- продолжительность влияния параметров окружающей среды на скопление материала известного размера и теплофизических характеристик;
- продолжительность пребывания скопления материала известного размера и теплофизических характеристик в среде с заданными параметрами (температура, влажность, газовый состав).

МКМПНГ для определения класса опасности НГ не принимает во внимание указанные ранее факторы и их взаимное влияние, что приводит к необъективной оценке степени опасности груза. Следует также отметить, что опасные процессы самонагревания с переходом к самовозгоранию, выделение опасных газов и поглощение кислорода для рассматриваемых грузов могут происходить либо последовательно, либо параллельно. МКМПНГ не содержит требований и методик, позволяющих определять критерии и параметры размеров скопления материала по величине, а также условий окружающей среды, способствующих возникновению опасности.

Задачей исследования является определение безопасных технологических параметров морской перевозки железа прямого восстановления в зависимости от физико-химических свойств материала, его теплофизических характеристик и кинетических параметров процесса самовозгорания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Навалочные грузы, склонные к самонагреванию — это твердые сыпучие и волокнистые материалы органической и / или неорганической природы с кинетически неоднородными поверхностями. Их самонагревание, как правило, инициируется наличием влаги и / или примесей. При отсутствии теплоотвода от скопления груза из зоны с повышенной температурой скорость самонагревания возрастает, формируется очаг самовозгорания и начинается процесс окисления, который завершается гетерогенным горением (тлением).

Исследованы теплофизические модели самопроизвольного возникновения горения, на основе которых разработаны и апробированы на практике методы определения кинетических параметров процесса самовозгорания [4]. Выполним краткое математическое описание теплофизической модели, с помощью которой осуществляется прогноз условий теплового самовозгорания.

Критические условия самовозгорания определяются равенством:

$$\frac{E}{RT_B^2} Ce^{\frac{-E}{RT_B}} = m_{ox}, \quad (1)$$

где E — энергия активации, Дж/моль;

C — предэкспоненциальный множитель адиабатической скорости самонагревания, К/с;

$R = 8,314$ — универсальная константа, равная произведению константы Больцмана на число Авогадро, Дж/(моль·К);

T_B — критическая температура самовозгорания материала, К;

e — основание натурального логарифма;

m_{ox} — параметр (темп) охлаждения, с⁻¹.

Левая часть равенства (1) является производной адиабатической скорости самонагревания P_+ по температуре (темпом самонагревания) при критической температуре T_B :

$$m_E = P'_+|_{T_B} = \frac{E}{RT_B^2} Ce^{\frac{-E}{RT_B}}. \quad (2)$$

При неподвижном скоплении самонагревающегося материала темп охлаждения описывается формулой

$$m_{ox} = \frac{\Psi \alpha F}{c_p \rho V}, \quad (3)$$

где Ψ — критерий неравномерности нагрева;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

c_p — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);

ρ — насыпная плотность, кг/м³;

F — площадь поверхности скопления материала, м²;

V — объем скопления материала, м³.

Критическая для самовозгорания температура окружающей среды T_o связана с температурой T_B соотношением

$$T_o = T_B - \frac{RT_B^2}{E}. \quad (4)$$

Используя зависимость (4), можно определить T_B ,

$$T_B = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{R} - \sqrt{\frac{E^2}{R^2} - \frac{4ET_o}{R}} \right). \quad (5)$$

Критерий неравномерности нагрева определяется по формуле

$$\Psi = \frac{n\lambda}{\alpha R_x + n\lambda}, \quad (6)$$

где n — относительный температурный градиент;
 λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 R_x — определяющий размер скопления, м;
 α — коэффициент теплоотдачи, Вт / (м² · К).

Подставив значения m_{ox} и Ψ в формулу (1), получим определяющий размер скопления R_x :

$$R_x = -\frac{n\lambda}{2\alpha} + \sqrt{\left(\frac{n\lambda}{2\alpha}\right)^2 + \frac{in\lambda}{m_E c_p \rho}}, \quad (7)$$

где $i = FR_x V^1$ — коэффициенты формы скопления материала (1, 2, 3 — для плоскости, цилиндра и шара соответственно).

Время до начала самовозгорания скопления материала при хранении на причале или при транспортировке в трюме судна может быть определено по формуле

$$\tau = \frac{RT_n^2}{C(E - RT_n)} e^{E/RT_n} \approx \frac{RT_o^2}{CE} e^{E/RT_o}, \quad (8)$$

где T_n — начальная температура материала, К.

Энергия активации E и предэкспоненциальный множитель C связаны между собой изопараметрическим компенсационным уравнением

$$E = \hat{E} + RT_c (\ln C - \ln \hat{C}), \quad (9)$$

где $\hat{E}$ — изокинетическая энергия активации (примерно равна 22000 Дж/моль);

$\hat{C}$ — изокинетический предэкспонент (примерно равен 10 К/с);

T_c — температура компенсации, К.

Для определения значения предэкспоненциального множителя используем формулу

$$C = \exp \left(\ln \hat{C} + \frac{E - \hat{E}}{RT_c} \right). \quad (10)$$

Условия самовозгорания НГ определяются совокупностью следующих факторов:

- температуры материала и окружающей среды;
- кинетических параметров процесса самонагревания (E , C и T_c);
- теплофизических свойств самовозгорающихся материалов: теплопроводности, удельной теплоемкости, насыпной плотности;
- геометрических размеров и формы скопления материала;
- условий теплообмена самонагревающейся массы с окружающей средой (коэффициента теплоотдачи).

Таким образом, в случае использования самовозгорающихся материалов МНВ (SH), самовозгорание которых инициируется влагой и / или примесями и сопровождается выделением газов (МНВ (WF) и МНВ (WT)), должны быть известны их теплофизические характеристики: коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоотдачи, удельная теплоемкость, насыпная плотность.

Для определения кинетических параметров процесса самовозгорания (E , C и T_c) необходимы экспериментальные исследования для измерения темпа охлаждения и определения величины разогрева относительно заданной температуры термостатирования в суховоздушном термостате ΔT для нескольких, разных по массе и размерам, образцов груза. Полученный массив экспериментальных значений используется для построения графика зависимости адиабатической скорости самонагревания от температуры (рис. 1) и описывается уравнением

$$\ln P_+ = \ln C - E / (RT). \quad (11)$$

Энергия активации может быть определена по формуле

$$E = \frac{R(\ln P_{+,1} - \ln P_{+,2}) \cdot 10^3}{10^3 / T_{M,2} - 10^3 / T_{M,1}}. \quad (12)$$

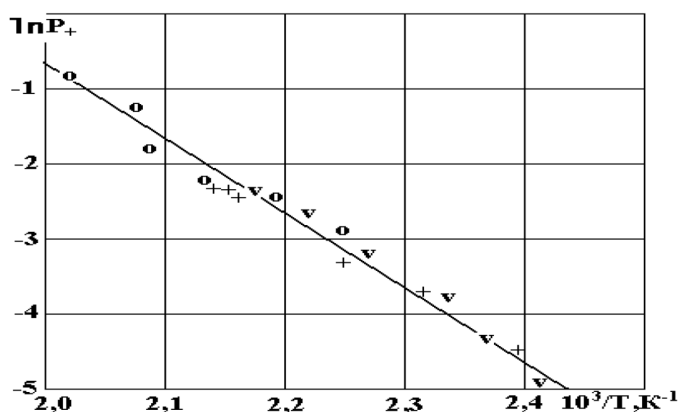


Рис. 1. Положение на общем графике экспериментальных точек, полученных по кривым «разогрев – время» при определении ΔT (v — в стадии самонагрева; o — при самовозгорании; + — по максимальным разогревам)

Значения $\ln P_+$ определяются по точкам на прямой, а не по фактическим экспериментальным точкам. Использование формул (9) и (11) позволяет определить кинетические параметры процесса самовозгорания. Наличие формализованной теплофизической модели дает возможность прогнозировать процесс самовозгорания МНВ (SH) по имеющемуся кинетическим параметрам и значениям теплофизических характеристик груза.

Сведения о теплофизических характеристиках материалов, по мнению авторов, должны предоставляться грузоотправителем в обязательном порядке с указанием их в паспорте безопасности химической продукции и MSDS. При отсутствии сведений о теплофизических значениях прогнозирование также возможно, но по результатам определения температурных условий теплового самовозгорания — экспериментально выявленных зависимостей между температурой окружающей среды, объемом (массой) скопления груза и временем до момента его самовозгорания.

Сущность данного метода состоит в определении температуры самовозгорания образца груза, помещенного в сетчатом контейнере заданного размера в суховоздушном термостате. В процессе испытаний определяется минимальная температура, при которой образец самовозгорается, а при температуре на пять градусов ниже этой температуры самовозгорания не происходит. Обработка опытных данных состоит в построении графиков зависимости логарифма температуры самовозгорания (рис. 2, а) от логарифма характерного размера контейнера и от логарифма времени до самовозгорания (рис. 2, б).

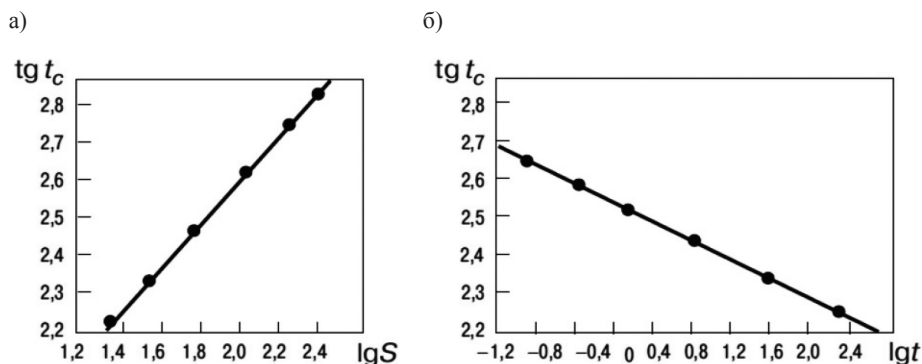


Рис. 2. Зависимость условий теплового самовозгорания от удельной поверхности (а) и времени до самовозгорания (б)

Для прогноза могут использоваться как графики, так и формулы. По известной температуре груза (желательно в геометрическом центре скопления) можно рассчитать и установить

безопасный размер скопления (штабеля) и период его хранения (транспортировки) при этой температуре. И, наоборот, для установленного размера скопления (штабеля) и продолжительности его хранения (транспортировки) при контроле температуры груза можно прогнозировать возникновение опасности самовозгорания. Однако подобный прогноз, по сравнению с прогнозом по кинетическим параметрам, будет приблизительным, а иногда и ошибочным (особенно для низких и отрицательных температур окружающей среды). Причина возможных ошибок состоит в том, что в интерпретации результатов испытаний твердых дисперсных материалов на склонность их к самовозгоранию не учтено значительное изменение условий теплоотдачи от ламинарного режима теплообмена к турбулентному, сопровождающее самонагревание больших объемов груза. В результате могут возникать существенные ошибки в определении условий самовозгорания реальных судовых партий МНВ (SH) при их формировании в порту и перевозке на судах.

Результаты (Results)

Для апробации теплофизической модели самопроизвольного возникновения горения и определения кинетических параметров процесса самовозгорания твердых дисперсных материалов исследовались образцы некоторых аналогов НГ, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика исследованных образцов аналогов НГ

Наименование образца	Массовая доля компонентов, %			Теплофизические параметры			
	Белок	Жир	Влага	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);	Насыпная плотность, кг/м ³	Принятое значение коэффициента теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)
Рыбная мука (ГОСТ 2716–82)	66,3	3,8	8,4	0,1	1500	670	11
Торф верховой низкой степени разложения (ГОСТ Р 51213–98)	–	–	53,0	0,1	1960	200	11
Жмых копры (Индонезия)	20,8	13,4	8,5	0,16	2350	540	11
Жмых копры (Филиппины)	17,5	16,4	8,1	0,16	2350	540	11
Уголь бурый (ГОСТ 32464–2013)	–	–	12,1	0,22	1720	560	11

Для определения темпа охлаждения испытуемой «навески» каждого образца НГ и ее разогревов использовались сетчатые цилиндрические контейнеры типа К-15 и К-30, причем для контейнеров К-15 выполнялось шесть–восемь разогревов, для К-30 — два–три разогрева. Термостатирование в суховоздушном термостате осуществлялось в интервале температур 135–235 °С.

По определенным экспериментальным значениям $m_{\text{ок},i}$ и величине разогревов ΔT были получены зависимости адиабатической скорости самонагревания от температуры для образцов НГ (рис. 3). Расчет энергии активации E осуществлялся с использованием уравнения (12), предэкспонента C — с использованием уравнения (10).

Средние значения результатов вычисления кинетических параметров процесса самовозгорания исследованных материалов приведены в табл. 2.

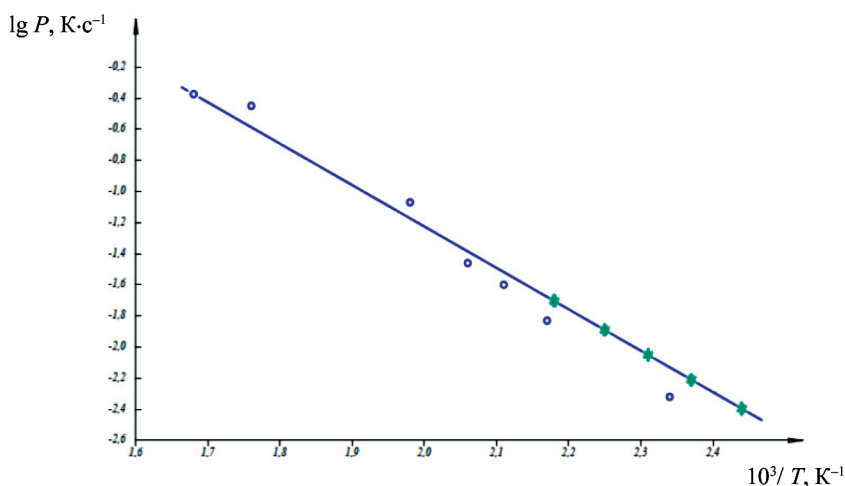
Таблица 2

Кинетические параметры процесса самовозгорания образцов навалочных грузов

Наименование груза	Кинетические параметры		
	E , Дж/моль	C , К/с	T_c , К
Рыбная мука	54000	$2,5 \cdot 10^4$	492
Торф	55000	$2,3 \cdot 10^4$	511
Жмых копры (Индонезия)	94000	$1,3 \cdot 10^9$	464
Жмых копры (Филиппины)	94000	$4,0 \cdot 10^7$	483
Уголь бурый	94000	$1,0 \cdot 10^8$	432

Полученные значения кинетических параметров процесса самосогревания могут быть использованы для прогнозирования основных параметров безопасной перевозки груза: допустимого размера скопления НГ, периода безопасности с точки зрения его самовозгорания при заданной температуре окружающей среды (период индукции), критических значений разогрева и температуры материала.

а)



б)

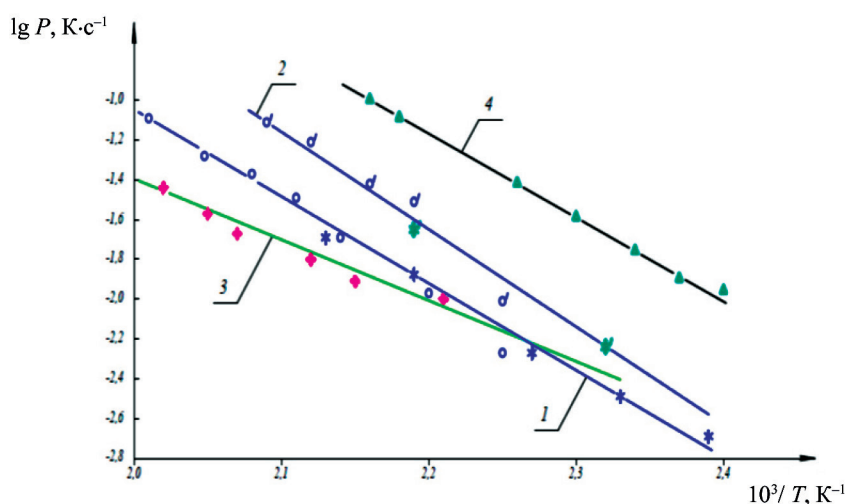


Рис. 3. Температурные зависимости адиабатической скорости самонагрева:

а — для рыбной муки; б — для образцов навалочных грузов

Условные обозначения: 1 — жмых копры (Филиппины); 2 — жмых копры (Индонезия);

3 — торф верховой низкой степени разложения; 4 — бурый уголь

Результаты прогнозирования с использованием теплофизических параметров для критического значения размера штабеля $X_{кр}$ и периода индукции τ приведены в табл. 3. Там же указано прогнозируемое значение опасного разогрева ΔT груза для реальных температур окружающей среды при хранении и транспортировке. Анализ приведенных в табл. 3 результатов позволяет сделать вывод о целесообразности и возможности перевозки груза навалом.

Таблица 3

**Прогноз влияния температуры окружающей среды на размер скопления груза
и время до образования очага его самовозгорания**

Температура окружающей среды, К (°С)	Критическая высота скопления цилиндрической формы, м	Время до самовозгорания, сут	Критический разогрев, К
<i>Рыбная мука</i>			
273 (0)	3,450	119,3	—
293 (20)	1,635	27,2	—
313 (40)	0,853	7,5	16,7
333 (60)	0,478	2,5	—
<i>Торф</i>			
273 (0)	4,84	91,2	—
293 (20)	2,40	22,9	—
313 (40)	1,30	6,93	17,4
333 (60)	0,76	2,44	—
<i>Жмых копры (Индонезия)</i>			
273 (0)	87,4	Безопасно в течение длительного периода времени	
293 (20)	22,76		
313 (40)	7,06	393	9,2
333 (60)	2,52	51	—
<i>Жмых копры (Филиппины)</i>			
273 (0)	46,88	Безопасно в течение длительного периода времени	
293 (20)	14,40		
313 (40)	5,16	210	10,5
333 (60)	2,10	35	—
<i>Бурый уголь</i>			
273 (0)	5,33	Безопасно в течение длительного периода времени	
293 (20)	1,72		
313 (40)	0,64	26,5	17,4
333 (60)	0,26	4,75	—

Для рассмотренных ранее грузов их безопасная перевозка навалом допустима при соблюдении следующих условий:

- для жмыха копры: высота бурта в трюме не превышает 7 м, если температура окружающей среды в течение рейса не будет превышать 40 °С;
- для торфа: высота бурта в трюме не превышает 5 м, если температура окружающей среды в рейсе продолжительностью не более 20 сут не будет превышать 20 °С.

Применение рассмотренных моделей на практике целесообразно при перевозке железа прямого восстановления (далее — ЖПВ). В России ЖПВ производят в форме окатышей и брикетов, в том числе отсевов разных фракций [5], [6]–[13]. Подобный груз имеет обобщающее наименование «Металлизированная продукция».

При определении темпа охлаждения используется термографическая установка. Контейнер с анализируемым материалом или монолитный образец предварительно нагревают в сушильном шкафу до температуры 130–140 °С, затем помещают в холодный термостат, обеспечивая ввод термодатчика в геометрический центр образца. Самописец записывает кривые охлаждения до тех пор, пока температура образца не примет значение температуры воздуха в термостате (рис. 4). Нагретое тело не имеет внутренних источников тепла, поэтому превышение его температуры $T_{\text{в}}$ над температурой окружающей среды T_0 с течением времени изменяется по экспоненциальному закону:

$$\Delta T = T_{\text{в}} - T_0 = \Delta T_{\text{нач}} e^{-m\tau}, \quad (13)$$

где $\Delta T_{\text{нач}}$ — начальная разность температур, К, в момент времени $\tau = 0$;

m — темп охлаждения, с^{-1} .

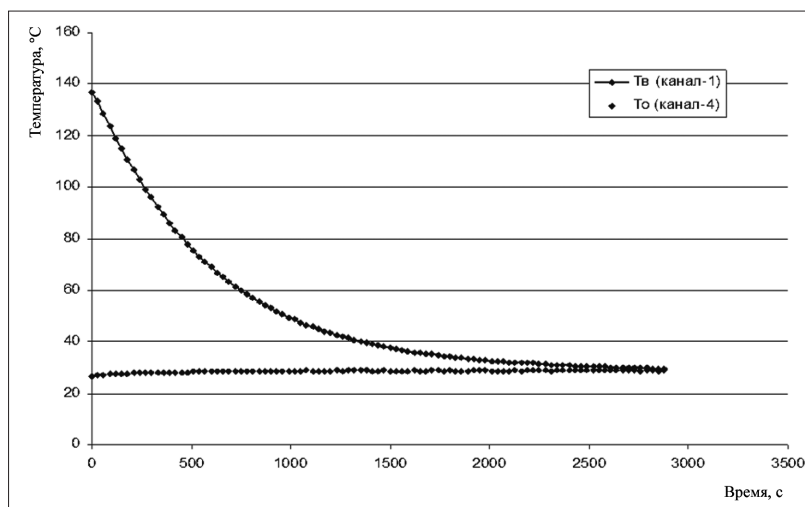


Рис. 4. Термограмма охлаждения нагретого образца в камере суховоздушного термостата

Координаты точек, полученных в результате логарифмирования текущих значений разности $T_{\text{в}}$ и T_0 , наносятся на график зависимости $\ln \Delta T$ от τ (рис. 5). При прогнозировании следует рассматривать только прямолинейный участок графика, так как его начальная часть искажена и соответствует нерегулярной (переходной) фазе, вызванной переносом исследуемого образца из горячего сушильного шкафа в холодный термостат, а конечная — выравниванию температур образца и окружающей среды, а также увеличению погрешности измерений.

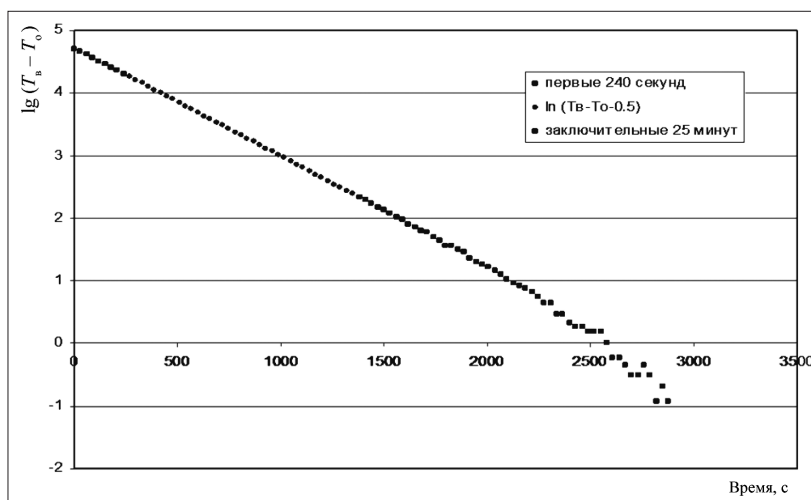


Рис. 5. График зависимости логарифма разности температур ($T_{\text{в}} - T_0$) от времени

Полученный график описывается линейной зависимостью с коэффициентами A_0 и A_1 :

$$\ln \Delta T = \ln \Delta T_{\text{нач}} - m\tau, \quad (14)$$

где A_0 — свободный член линейной зависимости, равный $\ln \Delta T_{\text{нач}}$, К;

A_1 — коэффициент полинома первой степени (тангенс угла наклона прямой), равный m , с^{-1} .

Коэффициент A_1 , а значит, и искомый темп охлаждения m могут быть определены методом наименьших квадратов. Численные значения темпов охлаждения для испытанных образцов брикетов ЖПВ, которые приведены в табл. 4, используются в расчете адиабатической скорости самонагрева при $P_- = P_+$.

Зависимость скорости самонагрева от температуры описывается уравнением

$$P_+ = ce^{-E/RT}, \quad (15)$$

где E — энергия активации, Дж/моль; c — предэкспонента скорости реакции, К/с; T — температура, К.

На основе результатов, проведенных экспериментов по определению величины разогревов для различных размеров образцов материала, получены термограммы «разогрев – время» для монолитного (рис. 6) и сыпучего образцов (рис. 7).

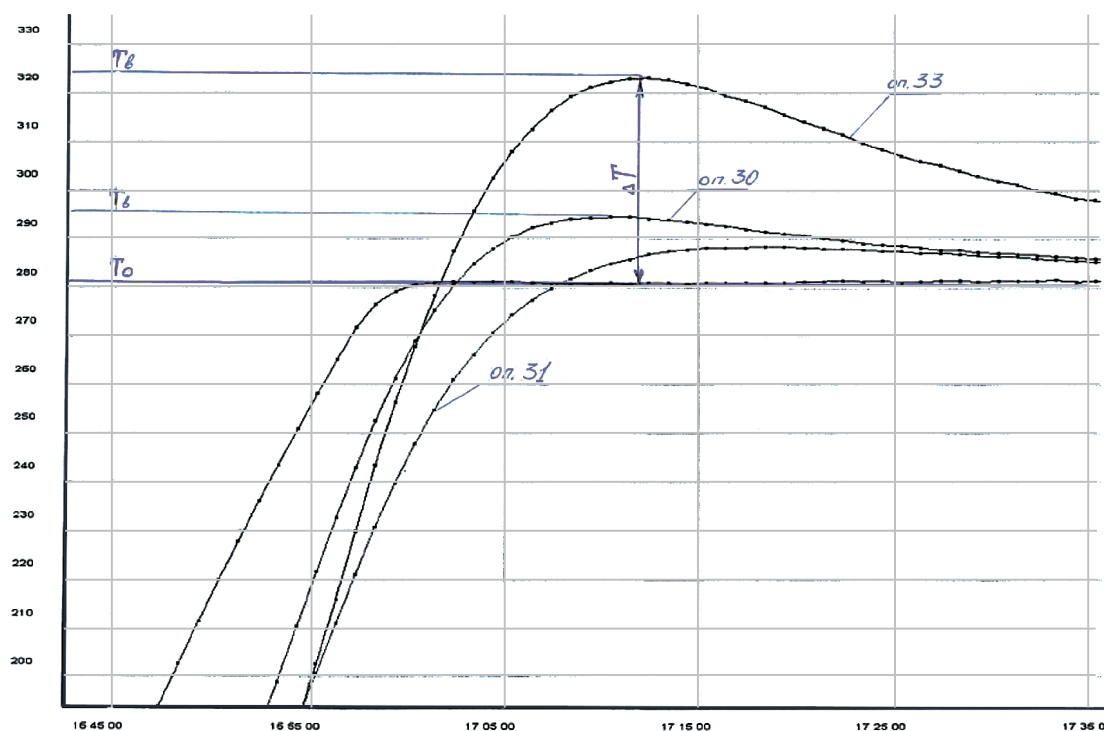


Рис. 6. Термограмма самонагрева образцов 1/4 от целого брикета при $T_0 = (280 \pm 1)^\circ$

В момент достижения максимальной температуры скорость самонагрева равна скорости теплоотвода:

$$P_- = P_+. \quad (16)$$

Эта зависимость может быть представлена в ином виде:

$$m(T_{\text{в}} - T_0) + P_+. \quad (17)$$

Использование уравнения (17) позволяет определить скорость самонагрева P_+ в зависимости от темпа охлаждения образца и разности температур в центре образца и окружающей среды.

Таблица 4

Исходные данные определения разогревов и результаты обработки наименьших квадратов для брикетов скорости самонагрева от температуры методом наименьших квадратов для брикетов

Номер образца	Характеристика образца и его масса	Температура в термостате, T_0 , °C / K	Температура в центре образца, $T_a = T_0 + \Delta T$, K	Разогрев, ΔT , K	Темп охлаждения, m , 1/с	Адиабатическая скорость самонагрева, $P = \tau \Delta T$, K/с	X , $1000 / T_a$	Y , $-\ln P$	Y_a , $A_0 + A_1 X$	Ошибка аппроксимации		Смесь Y_a , $A_0 + A_1 X$	Ошибка аппроксимации	
										абс.	%		абс.	%

MIDREX														
M-1	Брикет целый (599,1 г)	230/503	509	6	0,001353	8,118E-03	1,965	4,814	5,030562	-0,21689	4,51	5,006342	-0,19267	4,00
M-2	Брикет целый (591,2 г)	250/523	533	10	0,001437	1,437E-02	1,876	4,243	4,341282	-0,09867	2,33	4,346405	-0,10379	2,45
M-3	½ брикета (344,3 г; 344,8 г; 368,2 г)	250/523	533	10	0,001229	1,229E-02	1,876	4,399	4,341282	0,057687	1,31	4,346405	0,052564	1,19
M-4	½ брикета (305,3 г; 263,8 г)	260/533	549	16	0,001229	1,966E-02	1,821	3,929	3,915243	0,013723	0,35	3,938503	-0,00954	0,24
M-5	½ брикета (272,3 г)	270/543	563	20	0,001509	3,018E-02	1,776	3,501	3,562322	-0,06175	1,76	3,600607	-0,10003	2,86
M-6	¼ брикета (188,8 г)	270/543	552	9	0,001484	1,336E-02	1,812	4,316	3,83811	0,47768	11,07	3,864654	0,451136	10,45
M-7	¼ брикета (158,5 г)	280/553	596	43	0,001484	6,381E-02	1,678	2,752	2,79604	-0,04423	1,61	2,866946	-0,11513	4,18
M-8	¼ брикета (125,4 г)	290/563	598	35	0,001484	5,194E-02	1,672	2,958	2,752317	0,203349	6,94	2,825084	0,132582	4,48
M-9	¼ брикета (108,1 г)	300/573	610	37	0,002805	1,038E-01	1,639	2,265	2,495998	-0,23056	10,18	2,579677	-0,31424	13,87
M-10	Меньше ¼ брикета (61,2 г)	310/583	620	37	0,003317	1,227E-01	1,613	2,098	2,289979	-0,1922	9,16	2,382429	-0,28465	13,57
M-11	Меньше ¼ брикета (44,7 г)	320/593	649	56	0,003135	1,756E-01	1,541	1,740	1,728425	0,011285	0,65	1,844781	-0,10507	6,04
M-12	Меньше ¼ брикета (46,1 г)	320/593	635	40	0,003135	1,254E-01	1,575	2,076	1,993116	0,083066	4,00	2,098204	-0,02202	1,06
M-13	Меньше ¼ брикета (46,6 г)	320/593	633	42	0,003135	1,317E-01	1,580	2,027	2,031885	-0,00449	0,22	2,135322	-0,10793	5,32

HYL														
H-1	Брикет целый (--- г), 33,7 мм	230/503	509	6	0,00136	0,00816	1,965	4,809	4,934069	-0,12556	2,61	5,006342	-0,19783	4,11
H-2	Брикет целый (--- г), 33,5 мм	250/523	533	10	0,00136	0,01360	1,876	4,298	4,32377	-0,02608	0,61	4,346405	-0,04872	1,13
H-3	½ брикета (327,6 г); 32,7 мм	270/543	555	12	0,001297	0,01556	1,802	4,163	3,810697	0,352098	8,46	3,791603	0,371192	8,92
H-4	½ брикета (297,6 г); 33,0 мм	280/553	565	12	0,00154	0,01848	1,770	3,991	3,590691	0,400375	10,03	3,553703	0,437364	10,96
H-5	½ брикета (239,5 г); 31,7 мм	285/558	588	30	0,00177	0,05310	1,701	2,936	3,113075	-0,1775	6,05	3,037241	-0,10166	3,46
H-6	½ брикета (220,7 г); 31,1 мм	290/563	605	42	0,00173	0,07266	1,653	2,622	2,783395	-0,16143	6,16	2,680747	-0,05878	2,24
H-7	¼ брикета (170,6 г); 23,1 мм	280/553	568	15	0,00251	0,03765	1,761	3,279	3,5262	-0,24678	7,53	3,483966	-0,20454	6,24
H-8	¼ брикета (149,4 г); 21,5 мм	290/563	587	24	0,00221	0,05304	1,704	2,937	3,133063	-0,19635	6,69	3,058854	-0,12215	4,16
H-9	Меньше ¼ брикета (103,6 г); 21,9 мм	300/573	600	27	0,00223	0,06021	1,667	2,810	2,87842	-0,0685	2,44	2,783501	0,026416	0,94
H-10	Меньше ¼ брикета (67,4 г); 21,5 мм	310/583	601	18	0,00282	0,05076	1,664	2,981	2,859289	0,121358	4,07	2,762814	0,217833	7,31
H-11	Меньше ¼ брикета (57,8 г); 13,2 мм	320/593	617	24	0,00314	0,07536	1,621	2,585	2,561618	0,023861	0,92	2,440932	0,144547	5,59
H-12	Меньше ¼ брикета (50,1 г); 15,2 мм	330/603	638	35	0,00287	0,10045	1,567	2,298	2,193582	0,104513	4,55	2,042963	0,255132	11,10

Уравнение (15) может быть преобразовано путем логарифмирования:

$$\ln P_+ = \ln c - \frac{E}{R} \frac{1}{T}. \quad (18)$$

В результате замены переменных ($\ln P_+$ на Y , $\ln c$ на A_0 , $-E/R$ на A_1 , $1/T$ на X) зависимость (18) преобразуется в линейную:

$$Y = A_0 + A_1 X. \quad (19)$$

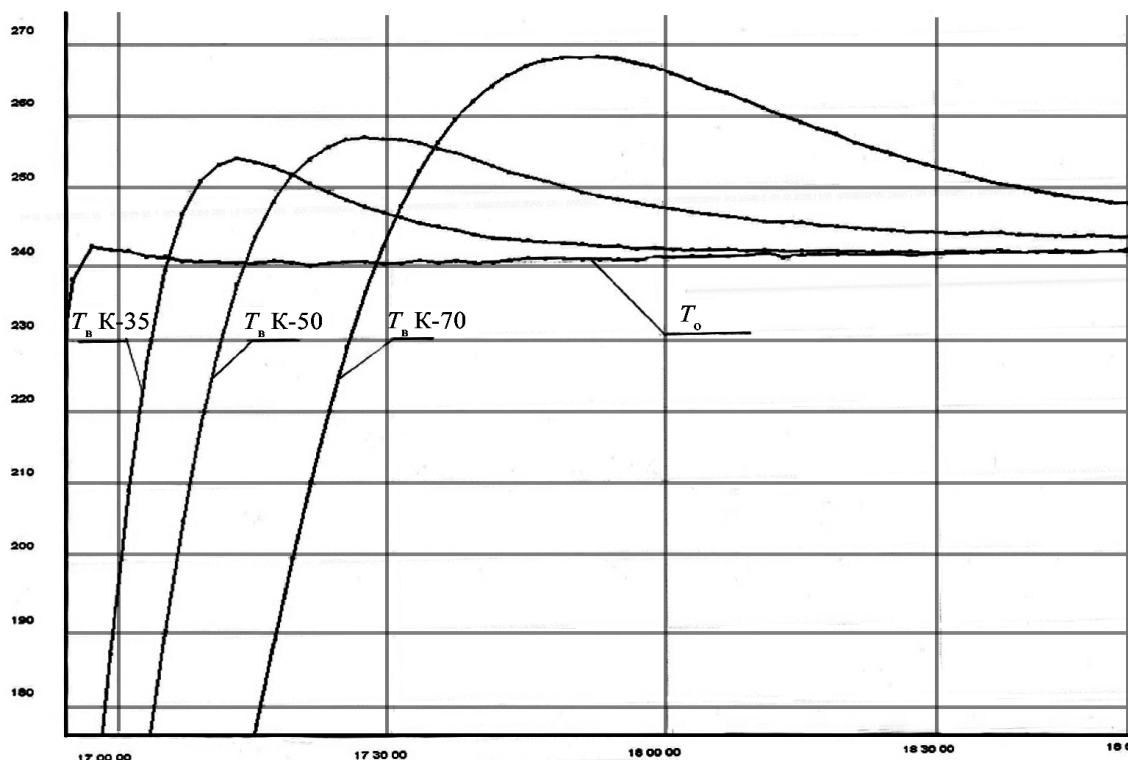


Рис. 7. Термограмма фиксации разогрева ΔT и влияния размера образца ГБЖ класса крупности 25–4 мм на его величину при $T_0 = 240^\circ\text{C}$

Полученные опытные значения кинетических параметров процесса самовозгорания приведены в табл. 4, результаты расчетного прогнозирования — в табл. 5. Прогнозирование выполнено для двух форм скоплений: цилиндрической и плоскопараллельной. Для всех видов ГБЖ при цилиндрической форме скопления критический размер (диаметр) примерно в два раза больше, чем при плоской форме (высота), независимо от уровня температуры окружающей среды. Опасность возникновения процесса теплового самовозгорания при значениях температуры окружающей среды более 75°C для брикетов и ГБЖ класса крупности менее 25 мм и выше 4 мм возникает в случае, если высота слоя штабеля / бурта превысит 2,3 м для брикетов и 0,7 м для горячего брикетированного железа (ГБЖ) класса крупности менее 25 мм и выше 4 мм. При этом, если в течение 26 сут для брикетного штабеля / бурта и пяти суток для ГБЖ класса крупности менее 25 мм и выше 4 мм не принимать меры для ее снижения, то температура в слое материала (груза) превысит критическое значение $T_b \approx 370\text{ K}$ (97°C) и образуется очаг самовозгорания в геометрическом (теплофизическом) центре.

Под температурой окружающей среды следует понимать температуру нагретой поверхности, контактирующей с грузом, или температуру верхнего слоя самого материала, внутри которого сконцентрирована некоторая критическая масса влажного ГБЖ. Зона концентрации влажного ГБЖ, которая самонагревается и для которой теплоприток от реакции окисления, будет выше теплоотвода и станет очагом самовозгорания.

Таблица 5

Прогноз режимов и условий транспортировки (хранения) ГБЖ при заданной температуре окружающей среды

Температура окружающей среды, T_{σ} , К (°С)	c_p , Дж/кг×К	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м×К	τ , сут	T_p , К	m_E	α_{k_2} , Вт·м ⁻² ·К ⁻¹	X_{kp} , м	α_{k+p^2} , Вт·м ⁻² ·К ⁻¹	X_{kp} , м	α_{k+p^2} , Вт·м ⁻² ·К ⁻¹	X_{kp} , м
ГБЖ в форме брикетов: $E = 62$ кДж × моль ⁻¹ ; $T_c = 655$ К; $C = 1,55 \cdot 10^4$ с ⁻¹												
273 (0)	512	2605	6,01	5657,8	283,8	5,557E-09	0,921	122,1	5,535	133,8	1,039	75,2
298 (25)	510	2605	5,89	684,0	311,0	4,596E-08	1,180	36,9	7,182	45,2	1,349	21,6
323 (50)	505	2605	5,77	116,2	338,4	2,704E-07	1,498	12,4	9,140	17,9	1,738	6,8
348 (75)	503	2605	5,50	25,8	366,0	1,219E-06	1,890	4,4	11,449	7,8	2,222	2,3
373 (100)	500	2605	5,22	7,1	393,8	4,444E-06	2,355	1,7	14,125	3,8	2,793	0,9
398 (125)	491	2605	4,95	2,3	421,9	1,365E-05	2,881	0,8	17,179	2,0	3,433	0,4
423 (150)	480	2605	4,67	0,9	450,2	3,644E-05	3,459	0,4	20,625	1,1	4,134	0,2
448 (175)	467	2605	4,37	0,4	478,7	8,656E-05	4,080	0,19	24,473	0,65	4,885	0,09
473 (200)	450	2605	4,05	4 ч	507,5	0,0001865	4,732	0,11	28,733	0,40	5,670	0,05
ГБЖ от 4 до 25 мм: $E = 53$ кДж × моль ⁻¹ ; $T_c = 617$ К; $C = 4,0 \cdot 10^3$ с ⁻¹												
273 (0)	515	2469	5,56	464,5	285,8	6,766E-08	1,358	30,2	5,972	36,4	1,552	17,7
298 (25)	520	2469	5,51	78,4	313,4	4,01E-07	1,705	9,9	7,707	14,1	1,980	5,5
323 (50)	540	2469	5,46	17,7	341,3	1,78E-06	2,140	3,5	9,782	6,1	2,520	1,8
348 (75)	547	2469	5,34	5,0	369,4	6,301E-06	2,645	1,4	12,203	2,9	3,141	0,7
373 (100)	550	2469	5,19	1,7	397,8	1,864E-05	3,212	0,6	14,981	1,5	3,833	0,3
398 (125)	550	2469	5,01	15,8 ч	426,5	4,769E-05	3,828	0,3	18,127	0,8	4,580	0,1
423 (150)	550	2469	4,81	7,0	455,6	0,0001083	4,488	0,1	21,653	0,5	5,376	0,1
448 (175)	554	2469	4,54	3,4	484,9	0,0002228	5,190	0,08	25,583	0,31	6,223	0,04
473 (200)	558	2469	4,27	1,8	514,5	0,0004221	5,925	0,05	29,925	0,20	7,107	0,02
Мелочь ГБЖ: $E = 40$ кДж·моль ⁻¹ ; $T_c = 717$ К; $C = 2,0 \cdot 10^2$ с ⁻¹												
273 (0)	518	2377	1,54	41,8	290,5	7,511E-07	2,304	4,8	6,918	5,7	2,634	2,8
298 (25)	540	2377	1,56	11,4	319,2	2,749E-06	2,690	2,1	8,692	2,8	3,114	1,2
323 (50)	554	2377	1,57	3,9	348,2	8,114E-06	3,123	1,0	10,766	1,5	3,655	0,5
348 (75)	583	2377	1,63	1,5	377,6	2,026E-05	3,614	0,5	13,172	0,9	4,266	0,3
373 (100)	608	2377	1,68	17 ч	407,5	4,426E-05	4,143	0,3	15,913	0,6	4,919	0,1
398 (125)	618	2377	1,68	8,7	437,8	8,687E-05	4,686	0,2	18,984	0,4	5,582	0,1
423 (150)	624	2377	1,66	4,8	468,7	0,0001561	5,241	0,1	22,407	0,3	6,257	0,1
448 (175)	629	2377	1,66	2,9	500,0	0,0002609	5,805	0,07	26,198	0,20	6,941	0,03
473 (200)	632	2377	1,64	1,8	531,8	0,0004102	6,374	0,05	30,375	0,15	7,628	0,02
Плоскопараллельный слой												
273 (0)	512	2605	6,01	5657,8	283,8	5,557E-09	0,921	122,1	5,535	133,8	1,039	75,2
298 (25)	510	2605	5,89	684,0	311,0	4,596E-08	1,180	36,9	7,182	45,2	1,349	21,6
323 (50)	505	2605	5,77	116,2	338,4	2,704E-07	1,498	12,4	9,140	17,9	1,738	6,8
348 (75)	503	2605	5,50	25,8	366,0	1,219E-06	1,890	4,4	11,449	7,8	2,222	2,3
373 (100)	500	2605	5,22	7,1	393,8	4,444E-06	2,355	1,7	14,125	3,8	2,793	0,9
398 (125)	491	2605	4,95	2,3	421,9	1,365E-05	2,881	0,8	17,179	2,0	3,433	0,4
423 (150)	480	2605	4,67	0,9	450,2	3,644E-05	3,459	0,4	20,625	1,1	4,134	0,2
448 (175)	467	2605	4,37	0,4	478,7	8,656E-05	4,080	0,19	24,473	0,65	4,885	0,09
473 (200)	450	2605	4,05	4 ч	507,5	0,0001865	4,732	0,11	28,733	0,40	5,670	0,05
Плоскопараллельный слой												
273 (0)	515	2469	5,56	464,5	285,8	6,766E-08	1,358	30,2	5,972	36,4	1,552	17,7
298 (25)	520	2469	5,51	78,4	313,4	4,01E-07	1,705	9,9	7,707	14,1	1,980	5,5
323 (50)	540	2469	5,46	17,7	341,3	1,78E-06	2,140	3,5	9,782	6,1	2,520	1,8
348 (75)	547	2469	5,34	5,0	369,4	6,301E-06	2,645	1,4	12,203	2,9	3,141	0,7
373 (100)	550	2469	5,19	1,7	397,8	1,864E-05	3,212	0,6	14,981	1,5	3,833	0,3
398 (125)	550	2469	5,01	15,8 ч	426,5	4,769E-05	3,828	0,3	18,127	0,8	4,580	0,1
423 (150)	550	2469	4,81	7,0	455,6	0,0001083	4,488	0,1	21,653	0,5	5,376	0,1
448 (175)	554	2469	4,54	3,4	484,9	0,0002228	5,190	0,08	25,583	0,31	6,223	0,04
473 (200)	558	2469	4,27	1,8	514,5	0,0004221	5,925	0,05	29,925	0,20	7,107	0,02
Плоскопараллельный слой												
273 (0)	518	2377	1,54	41,8	290,5	7,511E-07	2,304	4,8	6,918	5,7	2,634	2,8
298 (25)	540	2377	1,56	11,4	319,2	2,749E-06	2,690	2,1	8,692	2,8	3,114	1,2
323 (50)	554	2377	1,57	3,9	348,2	8,114E-06	3,123	1,0	10,766	1,5	3,655	0,5
348 (75)	583	2377	1,63	1,5	377,6	2,026E-05	3,614	0,5	13,172	0,9	4,266	0,3
373 (100)	608	2377	1,68	17 ч	407,5	4,426E-05	4,143	0,3	15,913	0,6	4,919	0,1
398 (125)	618	2377	1,68	8,7	437,8	8,687E-05	4,686	0,2	18,984	0,4	5,582	0,1
423 (150)	624	2377	1,66	4,8	468,7	0,0001561	5,241	0,1	22,407	0,3	6,257	0,1
448 (175)	629	2377	1,66	2,9	500,0	0,0002609	5,805	0,07	26,198	0,20	6,941	0,03
473 (200)	632	2377	1,64	1,8	531,8	0,0004102	6,374	0,05	30,375	0,15	7,628	0,02

Данные табл. 5 позволяют прогнозировать вероятность самовозгорания в трюме судна груза ГБЖ, в котором имеются зоны увлажнения, осуществляется контроль температуры поверхности груза (обязательное требование МКМПНГ для всех видов (ЖПВ)) и дополнительно контролируется нижний слой груза со стороны двойного дна. Так, в случае, если температура поверхности груза или его нижних слоев достигнет 75 °С и не прослеживается тенденция к ее снижению за расчетный период времени (период индукции τ), то при высоте виртуального цилиндра, вписанного в центральную часть насыпи груза в трюме, равной или более: для ГБЖ — брикет 4,4 м; для ГБЖ класса крупности 25–4 мм — 0,7 м; для мелочи ГБЖ — 0,3 м, температура в геометрическом центре скопления достигнет, соответственно, 366 К (93 °С), 369 К (96 °С) и 378 К (105 °С). Подобные значения температур далеки от установленных экспериментально температур самовозгорания $t_{\text{св}}$ для изученных форм ГБЖ (ЖПВ): ГБЖ брикет (ЖПВ-А) — 280–290 °С; ГБЖ класса крупности 25–4 мм (ЖПВ-В) — 220–270 °С; мелочь ГБЖ (ЖПВ-С) — 230–275 °С.

Таким образом, для груза ГБЖ брикет (ЖПВ-А) перевозка навалом безопасна при высоте выровненной насыпи, равной 4–5 м и продолжительности рейса не более 26 сут, при условии, что температура груза за период перевозки не превысит 348 К (75 °С). Перевозка ГБЖ класса крупности 25–4 мм (ЖПВ-В) будет безопасной в случае, если температура груза при погрузке не превышает 323 К (50 °С), а в течение рейса — 60–65 °С; высота выровненной насыпи в трюме не должна превышать 3,5–4 м, а длительность рейса — 18 сут, если температура груза за этот период не примет значение, по каким-либо причинам, более 341 К (68 °С). Перевозка навалом ЖПВ-С всегда будет связана с высоким риском возникновения пожара, поэтому целесообразно исключить из МКМПНГ индивидуальную опись на груз «Direct Reduced Iron (C), By-product fines» и перевозить мелочь / отсев (ЖПВ) в универсальных или специальных контейнерах для НГ. При загрузке в контейнер формируется только плоскопараллельный слой. Высота слоя металлизированной продукции в контейнере зависит от его грузоподъемности и УПО.

Очевидно, что перевозка брикетов (ЖПВ) в 20-футовых контейнерах практически безопасна (табл. 6). Расчетная высота слоя груза в контейнере не превышает $X_{\text{кр}}$, повышение температур до опасных уровней возможно лишь при нештатных ситуациях (горение соседнего контейнера, проведение огневых работ и т. д.).

Таблица 6

**Прогноз условий теплового самовозгорания металлизированной продукции
в 20-футовом контейнере**

Наименование груза	УПО, м ³ /т	Расчетная высота слоя груза в контейнере, м	Условия самовозгорания по прогнозу			
			$X_{\text{кр}}$, м	T_0 , °С	$T_{\text{в}}$, °С	τ , ч
Брикеты в. с.	0,366	0,76	0,9	100	120	168
ГБЖ кл. круп. 25–4 мм	0,405	0,84	0,7	75	96	120
Мелочь ГБЖ	0,421	0,87	0,5	50	75	96

Безопасность перевозки груза ГБЖ класса крупности 25–4 мм и мелочи ГБЖ будет обеспечена при высоте слоя груза в контейнере менее 0,7 м и 0,5 м соответственно. Таким образом, безопасная загрузка контейнера должна быть меньше допустимой на 16–18 % для ГБЖ класса крупности 25–4 мм и на 42 % для мелочи ГБЖ. Существует опасность самосогревания груза до уровня расчетных температур и перехода в состояние самовозгорания: для ГБЖ класса крупности 25–4 мм, в случае, если в течение пяти суток не будут приняты меры к охлаждению груза; для мелочи ГБЖ — в течение четырех суток. Очевидно, что 20-футовые контейнеры с этими видами металлизированной продукции пожароопасны при любом внешнем тепловом воздействии на них.

Транспортировка брикетов при допустимой загрузке 40-футового контейнера, с точки зрения самовозгорания материала, еще более безопасна, чем в 20-футовом контейнере (табл. 7), поскольку расчетная высота слоя груза в контейнере также не превышает $X_{\text{кр}}$ и уровни критических температур окружающей среды и груза достаточно высокие.

Таблица 7

**Прогноз условий теплового самовозгорания металлизированной продукции
в 40-футовом контейнере**

Наименование груза	УПО, м³/т	Расчетная высота слоя груза в контейнере, м	Условия самовозгорания по прогнозу			
			$X_{кр}$, м	T_0 , °C	T_v , °C	τ , ч
Брикеты в.с.	0,366	0,35	0,4	125	149	55
ГБЖ кл. круп. 25–4 мм	0,405	0,38	0,3	100	125	41
Мелочь ГБЖ	0,421	0,40	0,3	75	105	36

Безопасность перевозки груза ГБЖ класса крупности 25–4 мм и мелочи ГБЖ будет обеспечена при высоте слоя груза не более 0,3 м. Безопасная загрузка контейнера должна быть меньше допустимой на 21–23 % для ГБЖ класса крупности 25–4 мм и на 25 % для мелочи ГБЖ. Существует опасность самосогревания груза до уровня расчетных температур и перехода в состояние самовозгорания: для ГБЖ класса крупности 25–4 мм — в случае, если в течение 40 ч не будут приняты меры к охлаждению груза; для мелочи ГБЖ — 36 ч. Любое попадание на груз морской воды приведет к повышению температуры части груза в 1,3–1,5 раза и сокращению периода индукции примерно в 2 раза.

Заключение (Conclusion)

Определение кинетических параметров процесса самовозгорания для навалочного груза при известных теплофизических показателях материала и, как следствие, наличии расчетных критических значений высоты или диаметра слоя скопления, а также продолжительности транспортировки в зависимости от уровня контролируемых температур позволит обеспечить пожаробезопасность транспортных операций. Значения допустимой высоты груза по критерию пожарной безопасности в грузовом помещении судна и продолжительности рейса должны использоваться при составлении грузового плана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Internatioanal Asssociation of Dry Cargo Shipowners [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.intercargo.org/bulk-carrier-casualty-report—2017/> (дата обращения: 10.11.2018).
2. Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов (МКМПНГ) с поправкой 01-11 и дополнением. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. — 512 с.
3. Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов (МКМПНГ). Бюллетень изменений и дополнений № 1. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2015. — 82 с.
4. Киселев Я. С. Физические модели горения в системе пожарной безопасности / Я. С. Киселев, О. А. Хорошилов, Ф. В. Демехин. — СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 2009. — 388 с.
5. Пат. 2176213 Российская Федерация, МПК B63B 25/00. Способ хранения и транспортировки металлизированных окатышей / А. К. Барановская [и др.]; Заяв. и патентообл. ЗАО «Морское грузовое бюро». — № 2000103757; Заявлено 03.02.2000; Оpubл. 27.11.2001, Бюл. № 11. — 12 с.
6. Завидонский В. А. Пути защиты губчатого железа от вторичного окисления / В. А. Завидонский, В. С. Монахова, И. М. Гарина // Черная металлургия. — 1979. — Бюл. № 4. — С. 21–40.
7. НД № 2-030401-001. Руководство по техническому наблюдению за тарой для опасных грузов при оценке соответствия положениям Международного Кодекса морской перевозки опасных грузов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. — 20 с.
8. Кодекс практики безопасной загрузки и разгрузки навалочных судов. Резолюция А.862(20). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2011. — 80 с.
9. ГОСТ 12.1.044–89 (ИСО 4589–84). Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 2006. — 100 с.

10. ГОСТ 19433–88. Грузы опасные. Классификация и маркировка. — М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2004. — 49 с.

11. Kuznetsov A. L. Simulation for assessment of bulk cargo berths number / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. E. Slitsan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 87. — Is. 6. — Pp. 062010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062010.

12. Kuznetsov A. The Influence of the Storage Strategy on the Complexity of the Container Selection Procedure / A. Kuznetsov, A. Kirichenko, O. Izotov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 171. — Is. 1. — Pp. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012046.

13. Kuznetsov A. L. Simulation Model of Container Land Terminals / A. L. Kuznetsov, A. Kirichenko, J. J. Eglit // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — Is. 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.

REFERENCES

1. Internatioanal Association of Dry Cargo Shipowners. Web. 10 Nov. 2018 <<https://www.intercargo.org/bulk-carrier-casualty-report-2017/>>.

2. *Mezhdunarodnyi kodeks morskoi perevozki navalochnykh грузов (MKMPNG) s popravkoi 01-11 i dopolnieniem*. SPb.: ZAO “TsNIIMF”, 2012.

3. *Mezhdunarodnyi kodeks morskoi perevozki navalochnykh грузов (MKMPNG). Byulleten' izmenenii i dopolnenii №1*. SPb.: ZAO “TsNIIMF”, 2015.

4. Kiselev, Ya. S., O. A. Khoroshilov, and F. V. Demekhin. *Fizicheskie modeli goreniya v sisteme pozharnoi bezopasnosti*. SPb.: Sankt-Peterburgskii universitet Gosudarstvennoi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii, 2009.

5. Baranovskaya, A. K., G. A. Zinyagin, B. P. Kolesnikov, L. A. Kuli-shova, S. E. Lazutkin, and N. N. Ostroukh. RU 2176213, IPC B 63 B 25/00. Sposob khraneniya i transportirovki metallizovannykh okatyshai. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Nov. 2001.

6. Zavidonskii, V. A., V. S. Monakhova, and I. M. Garina. “Puti zashchity gubchatogo zheleza ot vtorichnogo okisleniya.” *Chernaya metallurgiya* 4 (1979): 21–40.

7. Russian Federation. Technical Surveillance Guide ND № 2-030401-001. Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za taroi dlya opasnykh грузов pri otsenke sootvetstviya polozheniyam Mezhdunarodnogo Kodeksa morskoi perevozki opasnykh грузов. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017.

8. *Kodeks praktiki bezopasnoi zagruzki i razgruzki navalochnykh sudov. Rezolyutsiya A.862(20)*. SPb.: ZAO “TsNIIMF”, 2011.

9. Russian Federation. State Standard GOST 12.1.044–89 (ISO 4589–84). Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazatelei i metody ikh opredele-niya. M.: FGUP «Standartinform», 2006.

10. Russian Federation. State Standard GOST 19433–88. Gruzy opasnye. Klassifikatsiya i markirovka. M.: IPK «Izdatel'stvo standartov», 2004.

11. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. E. Slitsan. “Simulation for assessment of bulk cargo berths number.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 87. No. 6. IOP Publishing, 2017. 062010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062010.

12. Kuznetsov, A., A. Kirichenko, and O. Izotov. “The Influence of the Storage Strategy on the Complexity of the Container Selection Procedure.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 171. No. 1. IOP Publishing, 2018. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012046.

13. Kuznetsov, A. L., Alexander Kirichenko, and J. J. Eglit. “Simulation Model of Container Land Terminals.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ситов Александр Николаевич —

кандидат экономических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sitov@mcb.spb.ru, kaf_top@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sitov, Alexandr N. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: sitov@mcb.spb.ru, kaf_top@gumrf.ru

Маловечко Владимир Александрович —

кандидат технических наук, доцент
ООО «Морское Грузовое Бюро»,
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Межевой канал, 4, офис 301
e-mail: malovechko@mcb.spb.ru

Слицан Андрей Евгеньевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: slicanae@gumrf.ru

Malovechko, Vladimir A. —

PhD, associate professor
Marine Cargo Bureau
office 301, 4 Mezhevoy canal, St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: malovechko@mcb.spb.ru

Slitsan, Andrey E. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: slicanae@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.

Received: November 15, 2018.