

УДК 656.615.073

**THE FORMATION OF THE TEMPERATURE FIELD OF A
STACK OF BULK CARGO IN THE HOLD****ФОРМИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШТАБЕЛЯ
НАВАЛОЧНОГО ГРУЗА В ТРЮМЕ СУДНА***V. D. Savchuk, PhD, professor***В. Д. Савчук, к.т.н., профессор***National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine**Національний університет «Одеська морська академія», Україна***ABSTRACT**

While carrying bulk cargo the crew of the vessel should consider the physico-chemical peculiarities and control parameters of hold microclimate for prevention of humidification or wetness. If the bulk cargo, inclined to the spontaneous heating and spontaneous combustion, is carried, the officers must take efficient measures to prevent the arising foci of growing temperature and the possible ignition in the holds as well.

The formulae, allowing the calculation of the temperature of bulk cargo massive in holds with the shifts in the parameters of the environment of the voyage route, are offered in the article.

Keywords: spontaneous heating, spontaneous combustion, bulk cargo, temperature of the stack, hold of the vessel.

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

Увеличение объемов и расширение номенклатуры перевозимых морем навалочных и насыпных грузов, в том числе опасных, вызвало необходимость совершенствовать нормирования условий их безопасной перевозки.

Термин «опасные грузы» объединяет грузы, которые вследствие наличия известных специфических агрессивных свойств могут стать причиной самосогревания, самовозгорания, пожара, взрыва, а также заболевания людей. Классификация и условия морской перевозки опасных навалочных грузов представлены в IMDG Code [1]: класс 4, подкласс 4,1 – легковоспламеняющиеся твердые вещества, например, SULPHUR (легко воспламеняется, а при горении выделяет токсичный и удушливый газ, при перевозке навалом может произойти взрыв пыли); 4,2 – самовозгорающиеся вещества, например, COPRA (склонен к самонагреванию и самовоспламенению); 4,3 – вещества, выделяющие легковоспламеняющиеся газы при взаимодействии с водой, например, ALUMINIUM SILICON, FERROSILICON (при увлажнении или взаимодействии с водой выделяют

водород, образующий взрывоопасные смеси с воздухом, могут выделять высокотоксичные газы – фосфин и арсин) и др.

При плавании судна в различных климатических условиях под воздействием переменных параметров внешней среды (температуры наружного воздуха $t_{нв}$, его относительной влажности φ , температуры точки росы τ , температуры забортной воды $t_в$, температуры груза $t_г$) в трюме судна формируется определенный микроклимат, который, в свою очередь, оказывает существенное воздействие на состояние перевозимого груза.

Морским транспортом перевозится большая номенклатура навалочных и насыпных грузов, в массе которых, под воздействием агрессивных факторов внешней среды, активизируются процессы окисления.

Экзотермичность реакций, которые протекают, например, в грузе угля, находящемся в трюме судна, при наличии воздуха, вызывает разогрев окисляющейся массы штабеля до температур, при которых последний сначала самосогревается, а затем возможно его самовозгорание.

С целью предотвращения возникновения аварийных ситуаций и возможного самовозгорания груза судоводителю необходимо строго соблюдать температурно-влажностный контроль загруженных трюмов, выполнять измерения температуры груза на каждой вахте. Если температура груза повысилась до $+60^{\circ}\text{C}$, то необходимо принимать срочные действенные меры к ликвидации очагов самонагревания.

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

Безопасной перевозке навалочных и насыпных грузов уделялось внимание в трудах отечественных и зарубежных исследователей [2, 3]. Математическая модель выбора оптимального варианта проведения грузовых операций с целью обеспечения их мореходной безопасности предложена в работе [4]. Определение конфигурации поверхности насыпного груза в трюме судна с использованием метода Нелдера-Мида отражено в статье [5]. Как подтвердили исследования [6], самосогревание угля при его перевозке морем начинается внутри штабеля груза, а выделяемое при этом тепло не успевает рассеиваться, что и приводит к возгоранию груза.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Целью статьи является разработка алгоритма для расчета температурного поля штабеля навалочного груза во избежание возможного формирования очага самосогревания или самовозгорания в грузовом помещении судна.

Изложение материалов исследования с обоснованием полученных научных результатов

Важным условием безопасного хранения и транспортировки навалочного или насыпного груза является недопущение накопления в его массе тепловой энергии. Поэтому необходима практическая проверка изотермичности

состояния такого груза при перевозке морем. Если груз «режимный», то в течение всего рейса судна необходимо осуществлять рефрижерацию или вентилирование его трюмов. К режимному виду груза относятся и угли, которые при рекомендуемой интенсивной вентиляции трюмов, более активно вступают в окислительный процесс с кислородом трюмного воздуха и, самосогреваясь, повышают свою температуру. Такое обстоятельство требует отвода тепла за счет низкого температурного потенциала приточного воздуха.

Для того, чтобы прогнозировать температуру навалочного груза в каждом наперед заданном объеме грузового помещения с целью предотвращения возникновения возможных очагов отпотевания, увлажнения или подмочки, самонагревания, и даже самовозгорания груза, предлагается применить метод конечных разностей или метод сеток.

Для решения такой задачи область непрерывного изменения аргументов x, y, z, τ заменяется сеткой, т.е. дискретным, конечным множеством точек, называемых узлами. Разность одних и тех же аргументов для двух смежных узлов $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau$ называется шагом изменения этих аргументов. Шаги могут быть как постоянные, так и переменные. Заменяя дифференциальное уравнение теплопроводности уравнением в конечных разностях, а краевые условия – разностными схемами, получаем систему уравнений в конечных разностях с числом неизвестных значений температур груза t_{Γ_i} равных числу узлов сетки. При этом соблюдаются важнейшие свойства разностных схем – аппроксимируемость, устойчивость, сходимость.

Аппроксимируемость – при стремлении шагов аргументов к нулю решение системы алгебраических уравнений стремиться к решению при заданных краевых условиях.

Сходимость – при сгущении сетки решение системы алгебраических уравнений приближается к решению дифференциальных уравнений при заданных краевых условиях.

Устойчивость – при уменьшении шагов, т.е. сгущении сетки, не происходит больших искажений решений.

Уравнение температурного поля штабеля груза, находящегося в трюме в случае отсутствия внутреннего источника тепла для случая двумерной стационарной теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Введем соответствующие ему уравнения в конечных разностях. Обозначим при этом температуры груза в точке 0 и узлах сетки 1,2,3,4 соответственно $t_{\Gamma_0}, t_{\Gamma_1}, t_{\Gamma_2}, t_{\Gamma_3}, t_{\Gamma_4}$. Тогда градиент температуры груза в направлении оси x для точки 0' (рис 1) запишется

$$\left(\frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial x} \right)_{x+\frac{\Delta x}{2}}; y = (t_{\Gamma_3} - t_{\Gamma_0})/\Delta x. \quad (2)$$

Аналогично градиент температуры для т. 0'':

$$\left(\frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial x}\right)_{x-\frac{\Delta x}{2}; y} = (t_{\Gamma 0} - t_{\Gamma 1})/\Delta x. \quad (3)$$

Определяем вторую производственную в направлении оси x для т. 0:

$$\frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial x^2} x, y \cong \frac{1}{\Delta x} \left[\left(\frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial x}\right)_{x+\frac{\Delta x}{2}; y} - \left(\frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial x}\right)_{x-\frac{\Delta x}{2}; y} \right] = \frac{1}{(\Delta x^2)} (t_{\Gamma 1} + t_{\Gamma 3} - 2t_{\Gamma 0}). \quad (4)$$

Таким же образом находим вторую производную в направлении оси y для т.0:

$$\frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial y^2} x, y \cong \frac{1}{(\Delta y^2)} (t_{\Gamma 2} + t_{\Gamma 4} - 2t_{\Gamma 0}). \quad (5)$$

Подставив значения этих производных из (4) и (5) в (1) при условии $\Delta x = \Delta y = \Delta$ получим разностную схему.

$$\frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial y^2} \cong \frac{1}{\Delta} (t_{\Gamma 1} + t_{\Gamma 2} + t_{\Gamma 3} + t_{\Gamma 4} - 4t_{\Gamma 0}) = 0, \quad (6)$$

или

$$t_{\Gamma 1} + t_{\Gamma 2} + t_{\Gamma 3} + t_{\Gamma 4} - 4t_{\Gamma 0} = 0. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что температура в любом узле сетки – среднее арифметическое температур в соседних четырех узлах сетки. Это фундаментальное свойство уравнений Лапласа положено в основу решения задач теплопроводности – релаксационного метода.

Применяя этот метод, запишем в узлах сетки ожидаемые, но произвольно выбранные, значение температуры груза t_{Γ} . В общем виде они будут удовлетворять условия (7). Если $t_{\Gamma 0}$ окажется больше среднего арифметического температур $t_{\Gamma 1}, t_{\Gamma 2}, t_{\Gamma 3}, t_{\Gamma 4}$, то это означает, что в т.0 находится источник тепла, если меньше – сток теплоты.

Разностная схема примет вид:

$$t_{\Gamma 1} + t_{\Gamma 2} + t_{\Gamma 3} + t_{\Gamma 4} - 4t_{\Gamma 0} = R_0. \quad (8)$$

Величину R_0 называем остатком для т.0 и запишем в виде

$$R_0 = \frac{q_V}{\lambda} \Delta, \quad (9)$$

где q_V – объемная плотность теплового потока в т.0, Вт/м³.

Используя уравнение (9) находим остаток для всех узлов сетки. Там где остаток R_0 оказывается наибольшим по абсолютной величине, значение температуры выбраны наименее удачно. Предположим, что в т.0 величина R_0 наибольшая (рис.1), тогда наибольший R делим на 4 и добавляем $\frac{1}{4}R_0$ к остаткам соседних четырех точек, а температуру узла, где находился наибольший остаток, увеличиваем на $\frac{1}{4}$ первоначального остатка, тогда очевидно, что остаток в узле 0 становится равным нулю.

$$t_{\Gamma_1} + t_{\Gamma_2} + t_{\Gamma_3} + t_{\Gamma_4} - 4t'_{\Gamma_0} = 0, \quad (10)$$

здесь

$$t'_{\Gamma_0} = t_{\Gamma_0} + \frac{1}{4}R_0. \quad (11)$$

Остаток в точках 1,2,3,4 увеличиваем на величину $\frac{1}{4}R_0$, например, в т.1.

$$R'_1 = R_1 + \frac{1}{4}R_0. \quad (12)$$

Далее все операции повторяем для следующего узла с наибольшим остатком, а завершается расчет в том случае, когда остатки внутренних узлов сетки обратятся в нуль или будут пренебрежимо малы.

Условие для трехмерного температурного поля запишем в виде:

$$t_{\Gamma_1} + t_{\Gamma_2} + t_{\Gamma_3} + t_{\Gamma_4} + t_{\Gamma_5} + t_{\Gamma_6} - 6t_{\Gamma_0} = 0. \quad (13)$$

Здесь следует отметить, что релаксационный метод решения системы разностных уравнений применим в случае определения температурного поля груза с малым числом узлов, не более 20. Если необходимо рассчитать большое температурное поле (число узлов > 20), то для решения системы разностных уравнений приемлемо использовать итерационные методы Зейделя.

Для решения этой задачи при нестационарном режиме дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_{\Gamma}}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial \tau}, \quad (14)$$

следует записать для каждого узла сетки в конечных разностях, а первая производная τ имеет вид

$$\frac{\partial t_{\Gamma}}{\partial \tau} \cong \Delta t_{\Gamma} / \Delta \tau = (t'_{\Gamma_0} - t_{\Gamma_0}) / \Delta \tau, \quad (15)$$

где t_{Γ_0} – температура груза в т.0 в момент времени τ ; t'_{Γ_0} – температура груза в этой же точке через интервал времени $\Delta \tau$; $\alpha = \lambda / \rho G_v$ – коэффициент температуропроводности.

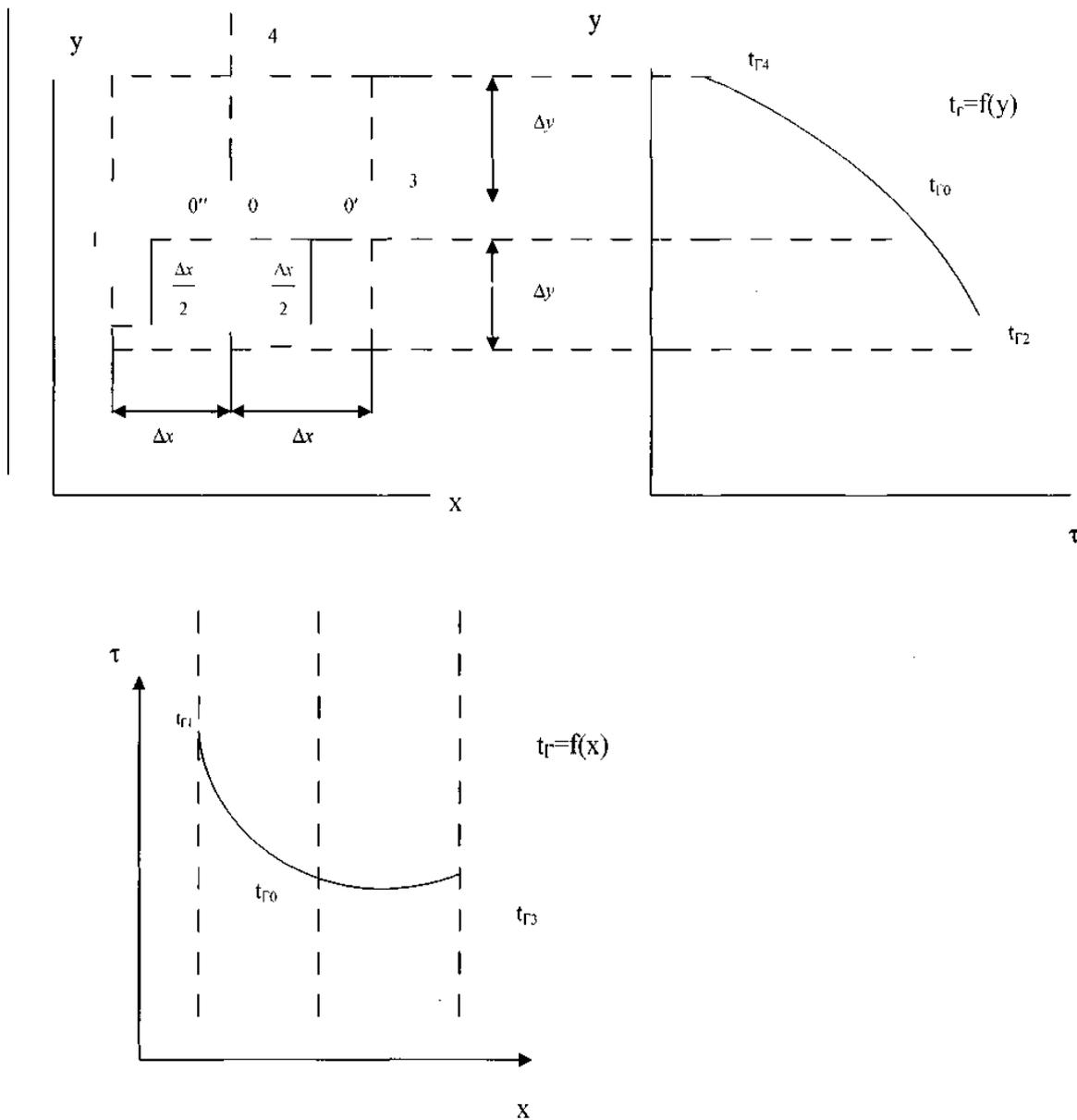


Рис. 1 Схема для расчета двухмерного температурного поля с использованием разностной сетки

Учитывая, что

$$\frac{\partial^2 t_C}{\partial x^2} x, y \cong \frac{1}{\Delta x} \left[\left(\frac{\partial t_r}{\partial x} \right)_{x + \frac{\Delta x}{2}; y} - \left(\frac{\partial t_r}{\partial x} \right)_{x - \frac{\Delta x}{2}; y} \right] \cong \frac{1}{(\Delta x)^2} (t_{r1} + t_{r3} - 2t_{r0}), \quad (16)$$

запишем вторую производную по y для t.0:

$$\frac{\partial^2 t_r}{\partial y^2} x, y \cong \frac{1}{(\Delta y)^2} (t_{r2} + t_{r4} - 2t_{r0}). \quad (17)$$

В конечных разностях для т.0 запишем

$$\frac{t_{Г1} + t_{Г3} - 2t_{Г0}}{(\Delta x^2)} + \frac{t_{Г2} + t_{Г4} - 2t_{Г0}}{(\Delta y^2)} + \frac{t_{Г5} + t_{Г6} - 2t_{Г0}}{(\Delta z^2)} = \frac{t'_{Г0} - t_{Г0}}{\alpha \Delta \tau}, \quad (18)$$

положив $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ получим:

$$t_{Г1} + t_{Г2} + t_{Г3} + t_{Г4} + t_{Г5} + t_{Г6} = \frac{\Delta(t'_{Г0} - t_{Г0})}{\alpha \Delta \tau}, \quad (19)$$

отсюда

$$t'_{Г0} = \frac{\alpha \Delta \tau}{\Delta} \left[(t_{Г1} + t_{Г2} + t_{Г3} + t_{Г4} + t_{Г5} + t_{Г6}) + \left(\frac{\Delta}{\alpha \Delta \tau} - 6 \right) t_{Г0} \right]. \quad (20)$$

Выражение (20) позволяет по известной начальной температуре груза в точке 0 равной $t_{Г0}$ в момент времени τ_0 и температурами $t_{Г1}, t_{Г2}, t_{Г3}, t_{Г4}, t_{Г5}, t_{Г6}$ на границе области определения найти неизвестную температуру $t'_{Г0}$ в рассматриваемой точке 0 в момент времени $\tau + \Delta \tau$. Таким образом, определяется температура во всех точках сетки (элементарных объемах груза) в момент времени $\tau + \Delta \tau$. Для отыскания значений температуры груза в этой же точке трюма в момент времени $\tau + 2\Delta \tau$, найденную ранее $t'_{Г0}(\tau + \Delta \tau)$ принимаем за известную и находим $t''_{Г0}(\tau + 2\Delta \tau)$.

Выполнив такой расчет многократно, определяем изменение температуры груза в рассматриваемой точке 0 его массива. Аналогично она определяется и для всех других, интересующих судоводителя, элементарных объемов грузового помещения.

Выводы и перспективы дальнейшей работы по данному направлению

Предлагаемый алгоритм позволяет выполнить расчет температурного поля штабеля навалочного груза в трюме судна и предотвратить возможное возникновение очагов возгорания, а также может быть использован как дополнение к судовой грузовой программе для облегчения судоводителю выбора режима транспортировки навалочных грузов, склонных к самосогреванию и самовозгоранию

ЛИТЕРАТУРА

1. International Maritime Dangerous Good Code. Volume 1, IMO, London. 2000. – 411 p.
2. Барановский М.Е. Безопасность морской перевозки навалочных грузов / М.Е. Барановский – М.; Транспорт, 1985. – 189 с.

3. Топе I.E. Carriage of Bulk grain without temporary fitting – Naval Architect, № 3. 1971. p. 457-471.
4. Цымбал Н.Н. Расчет границ множества допустимых стратегий проведения грузовых операций навалочных судов / Н.Н. Цымбал, Ю.Ю. Васьков // Судовождение: Сб. научн. трудов / ОНМА, Вып. 8. – Одесса: «Феникс», 2004. – С. 22-31.
5. Клименко Е.Н. Использование метода Нелдера-Мида для определения конфигурации поверхности насыпного груза в трюме судна / Е.Н. Клименко, В.Д.Савчук // Журнал «Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова – 2014. - № 3(8). - Новороссийск – С. 41-48.
6. Кубышкин С.В. Микроклимат трюмов судна при перевозке угля /С.В. Кубышкин/ Матеріали науково-технічної конференції «Стан і проблеми судноводіння». – ОНМА. Одеса, 24-26 жовтня 2005. – С. 82-88.