

УДК 629.56:536.248

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ И ХРАНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ГРУЗОВ НА ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЯХ

Казимиренко Ю.А.

*Национальный университет
кораблестроения им. адм. Макарова
Украина, г. Николаев
E-mail: u.a.kazimirenko@gmail.com*

Аннотация. С помощью решения задач теплообмена в плоской и трехмерной сопряженной постановке исследовано тепловое состояние грузовой зоны плавучих сооружений при перевозке радиоактивных веществ с остаточным тепловыделением. Определены поля распределения температур и скоростей воздуха.

Abstract. There was investigated the thermal state in the floating facilities cargo area during the transportation of radioactive substances with the residual heat release with the help of solving of the heat exchange problems in the plane and three-dimensional adjoint formulation. The fields of temperature and air velocity distribution have been defined.

Ключевые слова: тепловое состояние, плавучие композитные сооружения, радиоактивные вещества, мощность энерговыделения, конструкции биологической защиты

Key words: thermal state, floating composite facilities, radioactive substances, energy release power, constructions of biological protection.

Постановка проблемы. Безопасная перевозка радиоактивных грузов водным транспортом требует разработки конструкторских и технологических мероприятий, предусматривающих проектирование защитных конструкций с использованием новых радиационно-стойких материалов и покрытий, а также решения задач отвода тепла из грузовой зоны судна или плавучего сооружения. Большинство научных работ,

отражающих современный опыт эксплуатации специализированных объектов морской техники (складов, хранилищ и прочих плавучих сооружениях) не рассматривают безопасность хранения радиоактивных веществ (РАВ) с точки зрения процессов теплообмена [1, 2]. Радиоактивные грузы в зависимости от радионуклидного состава, уровня активности и агрегатного состояния остаются источниками излучений с определенной мощностью остаточного энерговыделения; процессы радиоактивного распада содержащихся в РАВ продуктов реакций деления и актинидов сопровождаются повышением температуры [3]. Методы контроля теплового состояния объектов энергетики включают прямые измерения температур и решение сопряженных задач с определением температурных полей в твердых телах и обтекающем воздухе с учетом теплообмена между ними [4]. Существующие модели [5, 6] описывают процессы теплового состояния и аспекты тепловой безопасности для технических средств наземного хранения ОЯТ в условиях воздействия внешних воздушных потоков и не могут быть применены для случаев хранения радиоактивных грузов на объектах морской техники.

Целью работы является решение частных задач теплообмена в грузовой зоне плавучего сооружения, предназначенного для перевозки и хранения РАВ с остаточным тепловыделением.

Изложение основного материала. Объект исследований – процессы теплообмена, происходящие в грузовой зоне плавучего сооружения, предназначенного для перевозки и хранения РАВ с мощностью энерговыделения 2...20 кВт. Груз размещается в герметично закрытых стальными крышками цилиндрических баках, изготовленных из углеродистой стали ВСт3 (ГОСТ 5521-93) и ограничивается конструкцией биологической защиты (БЗ), представляющей собой внешний корпус из плакированной стали (ГОСТ 10885-85). Внутренне пространство между плакированной

сталью и баком для РАВ может быть заполнено радиационно-стойким бетоном (ГОСТ 25192-2012). Проблема выбора материалов для изготовления конструкций БЗ была рассмотрена автором в работах [7, 8]. В работе [9] показаны перспективы применения металлостеклянных покрытий, защищающих стальную поверхность от радиационной повреждаемости. Это покрытия на основе Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70) и Св-АМг5 (ГОСТ 7871-75), наполненные полыми стеклянными микросферами (ТУ 6-48-108-94), порошками хрустального (ГОСТ 24315-80) и свинцовосодержащего (ГОСТ 9541-75) стекла, нанесение которых возможно электродуговым методом на внутреннюю поверхность баков. Защитная облицовка также может быть выполнена в виде горячепрессованных плиток, получаемых из смеси порошка или пудры алюминия (ГОСТ 6058-73, ГОСТ 5494-95) с полыми стеклянными микросферами (ПСМ), порошками SiC (ГОСТ 9428-73) или Al_2O_3 (ГОСТ 30558-98), крепление которых возможно с помощью клеевой композиции холодного отверждения на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 (ГОСТ 10589-84) с добавлением ($\approx 50\%$ объемн.) ПСМ. Обученные γ -лучами Co^{60} покрытия [9] прошли испытания на химическую стойкость в 20%-ных растворах соляной (HCl), серной (H_2SO_4) и азотной (HNO_3) кислот в течение 72, 240 и 840 часов при температуре $18 \pm 2^\circ C$, что важно при перевозке жидких радиоактивных грузов. Разрушаясь со скоростью $0,9 \dots 3,3 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ покрытия выполняют роль диффузионного барьера: продукт коррозии удерживается на поверхности Ст3, препятствуя доступу коррозионной среды и тормозит процесс разрушения основного металла.

Исследования процессов теплообмена проведены на примере плавучего сооружения с двойным и двойными бортами, предназначенного для долгосрочного хранения радиоактивных отходов [1]. В постановочном плане исследование теплового состояния

грузовой зоны сводится к расчету распределения температур в каждом из слоев конструкции БЗ и скоростей воздуха в пространстве двойного дна и двойного борта. Методика решения задачи базируется на создании математической модели и рассмотрена на примере одиночного цилиндрического бака, называемого далее цистерной биологической защиты, с теплопроводной стенкой, внутренний нагрев которой осуществляется радиоактивными грузами. Постановка задачи не учитывает наличия естественной и искусственной вентиляции, скоростей воды и воздуха; мощность остаточного тепловыделения РАВ ($Q = 2 \text{ кВт}; 8 \text{ кВт}; 20 \text{ кВт}$) приравнивается количеству тепла, выделенного грузом; форма баков принята цилиндрической, внешний корпус выполнен в виде параллелепипеда с учетом влияния закруглений корпуса судна, торцевые стенки цилиндрического бака – адиабатические. При расчетах коэффициент теплоотдачи на наружной обшивке корпуса судна $\alpha = 10 \text{ Вт}/\text{м}^2$, температура $t = 20^\circ C$. В основу численного моделирования положено математическое описание сопряженных процессов теплоотдачи при естественной конвекции и свободном турбулентном режиме движения разогретого воздуха (как несжимаемой жидкости) вдоль вертикальной пластины с высотой бака x [10]. Явление теплоотдачи (1) с поверхности конструкции БЗ описывается с помощью критериальных уравнений (1) – (6), учитывающих критерий Нуссельта $Nu_{жх}$ (2) независимый от координаты x ; температура воздуха в пространстве двойного борта определяется как среднее значение по формуле (3). Число Грасгофа $Gr_{жх}$ на координате x в диапазоне температур в пределах толщины многослойной конструкции БЗ, состоящей из n слоев разных материалов, с учетом коэффициента температурного расширения β воздуха вдоль стенки (4) и кинематической вязкости $\nu_{ж}$ определяется по

формуле (5); относительная температура стенки – по формуле (6).

$$\alpha_{БЗ} = \frac{Nu_{жс} \cdot \lambda}{x} \quad (1)$$

$$Nu_{жс} = 0,15 \cdot (Gr_{жс} \cdot Pr_{жс})^{1/3} \cdot (Pr_{жс} / Pr_c)^{0.25} \quad (2)$$

$$T_{\theta} = \frac{T_{внБЗ} + T_{зв}}{2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{273 + T_{жс}} \quad (4)$$

$$Gr_{жс} = \frac{T_{вн} g \beta v_c x^3}{T_0 v_{жс}^2} \quad (5)$$

$$T_c = \int_{Q_0}^{Q_i} T_{жс} - \int_{T_0}^{T_{внБЗ}} T_c \quad (6),$$

где: $T_{внБЗ}$ – температура на внешней стенке конструкции БЗ, К; $T_{зв}$ – температура заборной воды, К; T_0 – температура груза при разной мощности тепловыделения, К; T_c – температура в любой точке стенки многослойной конструкции БЗ, К; $T_{жс}$ – температура потока воздуха вдоль внутренней стенки бака, К; Q_0 – мощность тепловыделения груза (Вт) в процессе транспортировки при $T=273$, К; Q_i – граничное условие мощности тепловыделения груза, Вт; $v_{жс}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре $T_{вн}$, $v_{жс} = 18 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda_{жс}$ – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре $T_{вн}$, Вт/(м·К); g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с²; $Pr_{жс}$ – значение числа Прандтля для воздуха при температуре $T_{вн}$; Pr_c – значение числа Прандтля для воздуха при температуре стенки T_c .

Уравнение теплового баланса в постановочном для численного моделирования плане будет иметь вид:

$$\frac{m_{гр}}{V_{бака}} \frac{\partial Q}{\partial T} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Delta H W \quad (7)$$

где $m_{гр}$ – масса груза нетто, кг; $V_{бака}$ – объем бака, м³; Q – тепловыделение груза, приравненное по условиям

постановки задачи мощности остаточного энерговыделения РАВ; координата x – высота бака, м.; t – время (при стационарной задаче не учитывается), T – температура циркулирующего воздуха, К; v – линейная скорость потока воздуха, м/с²; λ – коэффициент теплопроводности РАВ, Вт/(м·К); ΔH – тепловой эффект экзотермической реакции, Дж; w – скорость экзотермической реакции, м/с

Значения толщин и коэффициентов теплопроводности применяемых материалов приведены в табл.

Таблица 1

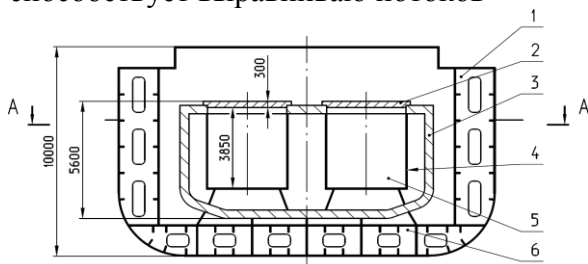
Значения толщин и коэффициентов теплопроводности

Элементы конструкции	Толщина, мм	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Внешний корпус из плакированной стали	400	42
Бетонная заливка из М500	800...1000	0,12
Баки для РАВ из ВСт3	50	40
Крышка для баков из плакированной стали	300	42
Защитный слой (композиция алюминий – стекло)	50	82

Сопряженная задача в трехмерной постановке решена с помощью методов численного моделирования [11], результаты получены в виде полей распределения температур (рис.1-2, а) и скоростей воздуха (б) для разных вариантов конструкций БЗ.

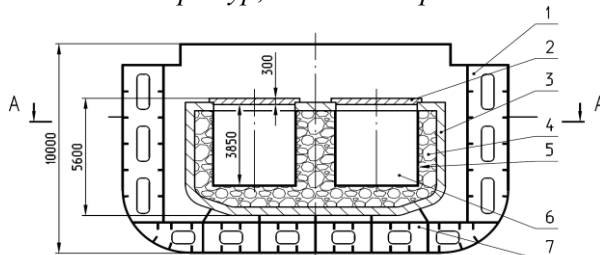
Результаты численного моделирования конвективного теплообмена показали неравномерность распределения температур по объему грузовой зоны: наиболее разогретой является верхняя часть модели, максимально приближенная к крышке бака, где температура в зависимости от мощности энерговыделения 2...20 кВт составляет

320...690 К; анализ воздушных потоков вдоль вертикальной стенки баков для РАВ, межбортном пространстве и пространстве двойного дна плавучего сооружения не выявил застойных зон, приводящих к аварийным ситуациям. Наличие в конструкции биологической защиты бетонной заливки толщиной 800...1000 мм способствует выравниваю потоков

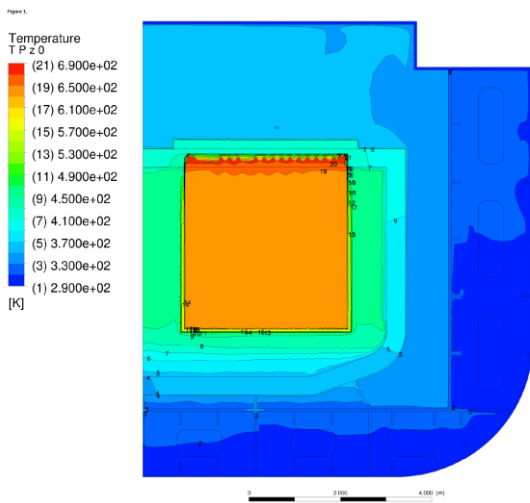


a

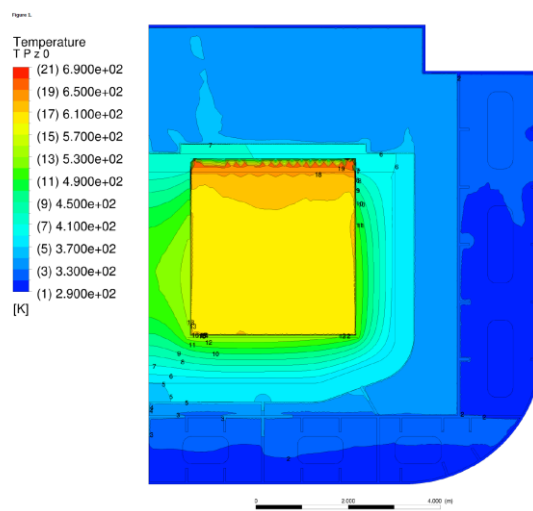
Рис. 1. Конструкция БЗ выполнена из плакированной стали, внутри которой на фундаментах расположены баки для хранения РАВ, изготовленные из нержавеющей стали:
 1 – двойной борт; 2 – крышка; 3 – внешний корпус БЗ; 4 – баки для РАВ; 5 – груз; 6 – двойное дно:
 а – схема конструкции; б – поля температур; в – поля скорости



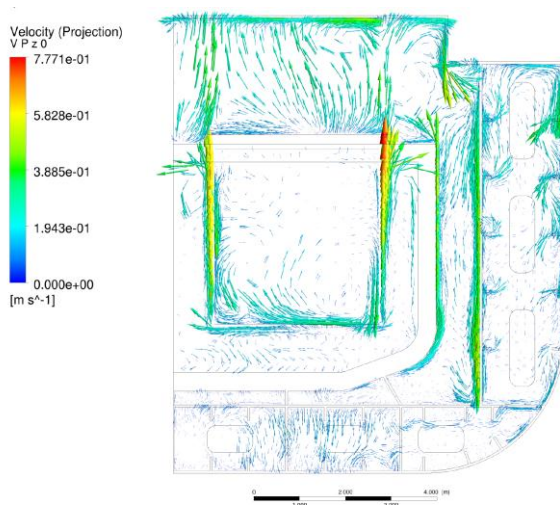
a



б



б



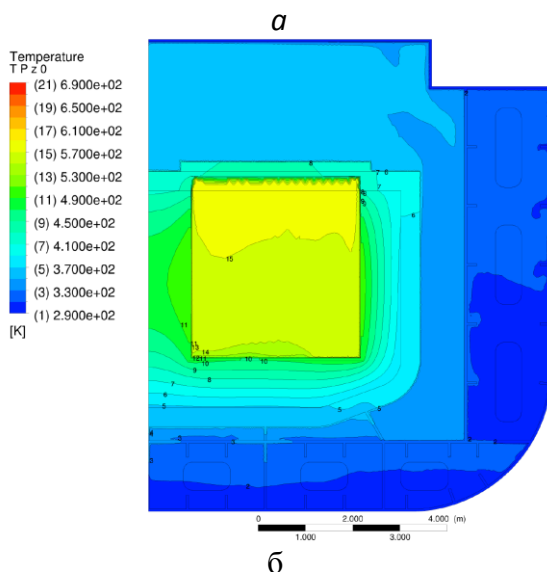
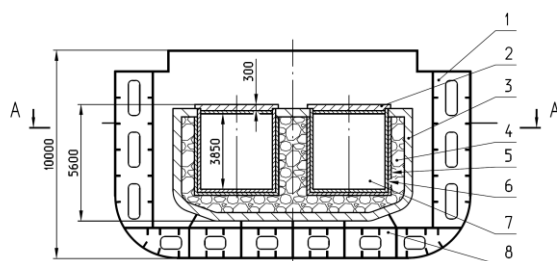
в

Рис. 2. Конструкция БЗ представляет собой параллелепипед из плакированной стали с бетонной заливкой: 1 – двойной борт; 2 – крышка; 3 – внешний корпус конструкции БЗ; 4 – заливка из композиционного бетона; 5 – баки для РАВ; 6 – груз; 7 – двойное дно: а – схема конструкции; б – поля температур

циркулирующего воздуха, предотвращая образование застойных пожароопасных зон, но не позволяет существенно увеличить теплосъем с горячих поверхностей бака: фактический вклад бетонного слоя в процессе отвода тепла составляет 5...35 %.

Нанесение на внутреннюю поверхность баков и крышки (рис. 3) электроду

говых покрытий на основе Св-08Г2С толщиной 2 мм на 28 % снижает интенсивность γ -излучений, но общая картина распределения полей температур и скоростей воздуха практически не отличается от теплового состояния грузовой зоны конструкций без защитного покрытия (рис. 2). Нанесение теплопроводного защитного слоя из стеклоалюминиевого материала на внутреннюю поверхность крышки снижает температуру внешней поверхности на 60...80 К, что объясняется низким термическим сопротивлением δ/λ . В зависимости от мощности тепловыделения грузов $Q = 2...20$ кВт температура покрытия составляет 370...530 К, температура бетонной заливки 290...410 К, а внешнего корпуса конструкции БЗ, выполненного из плакированной стали 290...370 К. Облицовка боковых стенок и дна обеспечивает дополнительный отвод тепла, предотвращая возникновение пожароопасных ситуаций на плавучем сооружении.



*Рис. 3. Конструкция БЗ с
металлостеклянным защитным слоем: 1 –
двойной борт; 2 – крышка; 3 – внешний корпус конструкции
БЗ (выполнен из плакированной стали); 4 –
заливка из композиционного бетона; 5 – баки
для РАВ; 6 – металлостеклянный защитный
слой; 7 – груз; 8 – двойное дно;
а – схема конструкции; б – поля температур*

Задаваясь в соответствии с Правилами МАГАТЭ максимальной температурой на наружных поверхностях крышки и корпуса БЗ 85°C, установлено, что на рассмотренных плавучих сооружениях без оборудования искусственной вентиляции и рефрижераторными установками могут безопасно перевозиться и храниться грузы, суммарная мощность тепловыделения которых не превышает 9 кВт (рис. 4а). Полученные результаты показали, что повышение температур в грузовой зоне плавучего сооружения сопровождается интенсивной циркуляцией воздуха, максимальная скорость которого в наиболее разогретом участке составляет 0,53 м/с.

Таким образом, численное моделирование температурных полей позволяет без проведения дорогостоящих экспериментальных работ получать локальные характеристики в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным и устанавливать ограничения по мощности перевозимых грузов. С помощью решения задач в плоской постановке получены распределения температур по толщине наиболее разогретых участков цистерны биологической защиты.

Решение задачи об эквивалентной теплопроводности многослойной стенки цистерны биологической защиты (рис. 4б) показало, что с уменьшением толщины бетонного слоя до 200 мм при перевозке грузов мощностью тепловыделения 2...8 кВт температура на его внешней поверхности составляет 38...7°C, что согласуется с Правилами МАГАТЭ; толщина клеевого слоя не влияет на процессы теплопроводности.

Установлено влияние металлостеклянного защитного слоя цистерн биологической защиты на плотность теплового потока, передаваемого излучением: покрытие толщиной 2 мм композиции Св-АМг5-стекло с приведенной степенью черноты $\varepsilon_{пр} = 0,44$ поглощает в 6 раз больше лучистой энергии, чем покрытие композиции Св-08Г2С-стекло с $\varepsilon_{пр} = 0,88$. Выполненная оценка удельных тепловых потоков показала, что величина плотности

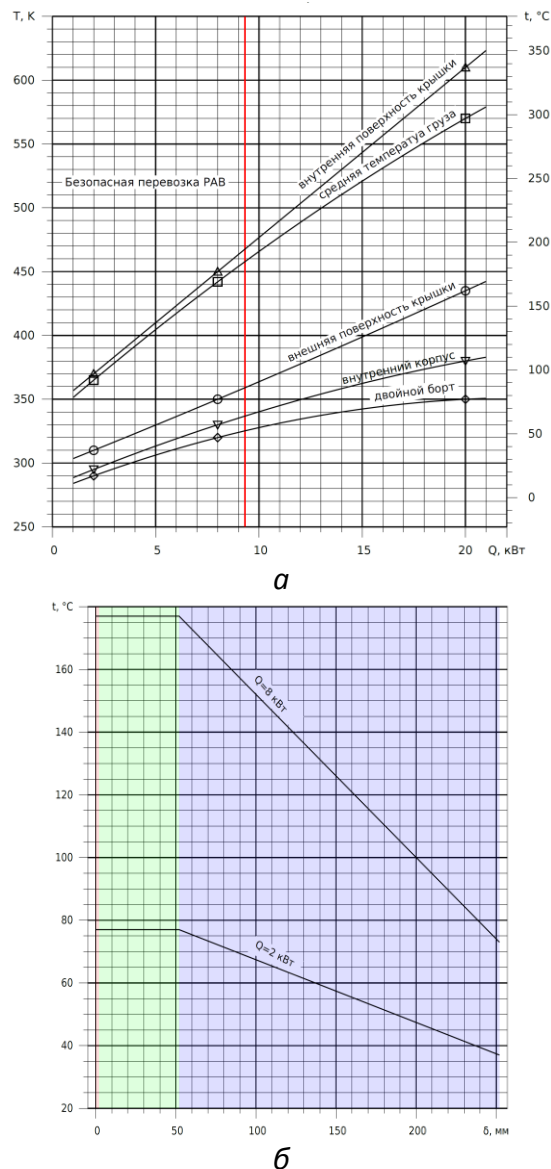


Рис. 4. Распределение температур:
 а – в грузовой зоне плавучего сооружения; б – в многослойной стенке цистерны биологической защиты

потока лучеиспускания в 1,5-3 раза меньше теплового потока, переданного теплопроводностью через многослойную стенку (рис. 5а) при перевозке РАВ с суммарной мощностью тепловыделения 8 кВт. Для турбулентного режима естественной конвекции определены значения температур (рис. 5б) на наружной поверхности двухслойной крышки цистерны биологической защиты плавучих сооружений. Установлено, что при температуре окружающего воздуха 38°C, условия МАГАТЭ соблюдаются при перевозке (хранении) РАВ с мощностью тепловыделения до 8 кВт.

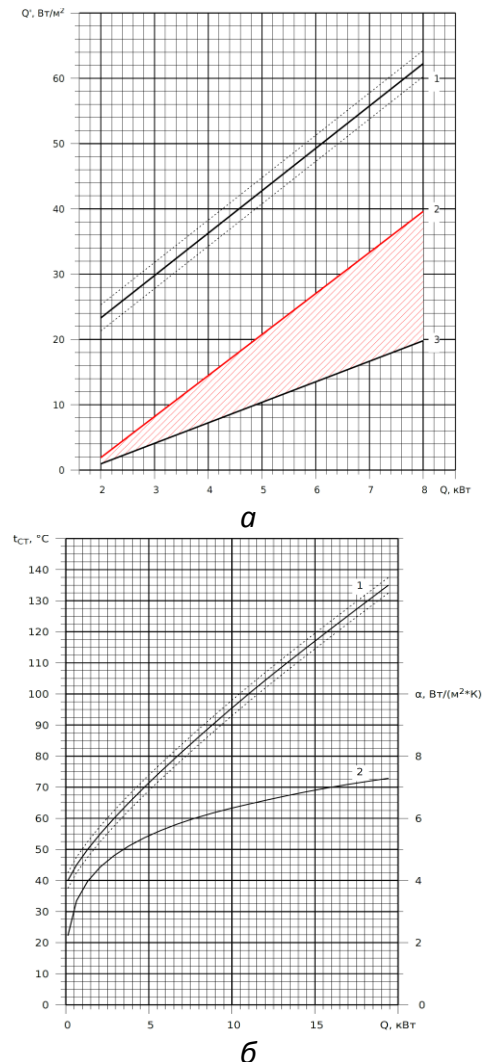


Рис. 5. Влияние мощности тепловыделения грузов на механизмы теплообмена:
 а – плотность теплового потока при разных механизмах теплообмена: 1 – теплопроводностью через многослойную плоскую стенку с алюмоматричным композиционным слоем; 2, 3 – лучистым теплообменом через

многослойную стенку с защитным покрытием композиции Св-08Г2С–стекло (2) и Св-АМз5–стекло (3) б – расчетные значения температуры (1) и коэффициента теплоотдачи (2) с поверхности крышки бака при конвективном теплообмене

Сравнение с результатами численного моделирования подтверждает достоверность полученных данных.

Выводы: 1. Впервые сформулирована и численно решена в трехмерной сопряженной постановке для условий естественной конвекции стационарная задача о тепловом состоянии в грузовой зоне плавучего сооружения, в основу которой положена геометрическая модель цилиндрического бака с многослойной теплопроводной стенкой, внутренний нагрев которого осуществляется радиоактивными грузами с мощностью энерговыделения 2...20 кВт, что позволит сократить время и материальные затраты на постановку и проведение дорогостоящих экспериментальных исследований с использованием сложных измерительных средств. 2. Установлено влияние каждого из слоев конструкции биологической защиты на процессы теплопередачи в условиях естественной конвекции с учетом лучистой составляющей разогретого до 460 К радиоактивного груза. 3. Полученные результаты расширяют научные представления о проектировании и модернизации судов и плавучих сооружений под перевозку и хранения радиоактивных грузов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашка М. М. Создание регионального центра перегрузки отработанного ядерного топлива на ФГУП «Атомфлот» / М.М. Кашка, А. Н. Абрамов, И.П. Честных // Арктика: экология и экономика, 2013. № 2. С. 72-79.
2. Наумов В.А. Контейнерное хранение проблемных видов отработавшего ядерного топлива судовых реакторных установок: аспекты тепловой безопасности [Текст]/ В.А. Наумов, С.А. Гусак // Вестник МГТУ, том 12, № 4, 2009. С.724–730.
3. Полуэктов П. П. Научные подходы и технические решения в области обращений с жидкими высокоактивными отходами [Текст]/ П.П. Полуэктов, Л.П. Суханов, Ю.И. Матюнин // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. 2005. Т. XLIX. № 4. С. 29-41.
4. Мацевитый Ю.М. Обратные задачи теплопроводности: В 2-х т. -Т. 1. Методология [Текст]. К.: Наук. Думка, 2002. –408 с.
5. Заведий Т. Ю. Моделированием температурного поля при нагнетании технологических жидких радиоактивных отходов в пласт-коллектор [Текст] / Т. Ю. Заведий // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т.317. № 1. С.188–194.
6. Алехина С. В. Решение сопряженной задачи тепломассообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом [Текст] / С.В. Алехина, В.Н. Голощапов, А.О. Костиков, Ю.М. Мацевитый // Проблемы машиностроения. Харьков, 2005. Т. 8, № 4. С. 12 – 20.
7. Казимиренко Ю. А. Формирование конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов [Текст]/Ю.А. Казимиренко // Технологический аудит и резервы производства, 2014, № 6/5(20). С.7-9.
8. Казимиренко Ю. А. Оценка технологичности композитных конструкций судов и плавучих сооружений на основе системотехнического подхода [Текст] / Ю. А. Казимиренко, В. В. Савочкина // Технологический аудит и резервы производства. 2015. № 4/1 (24). С. 65-68.
9. Казимиренко Ю.А. Радиационная стойкость металlostеклянных покрытий для плавучих композитных сооружений [Текст]/Ю.А.

- Казимиренко, В.В. Шла-
пацкая//Судостроение и морская
инфраструктура. 2015. № 1(3). С. 111 –
121.
10. Кутуладзе С.С. Теплопередача и гид-
родинамическое сопротивление
[Текст] / С. С. Кутуладзе. М.: Энерго-
атомиздат, 1990. 367 с.
11. Zhang X., Chen, J., Kang, W., Wu, J.
and Yuan, T. (2011). Heat transfer
coefficient calculation for analysis of
ITER shield block using CFX and
ANSYS. *Fusion Engineering and
Design*, 86(4-5), pp.312-317.
- Tövsiyə edib: t.e.d., prof. A.T.Məmmədov*