

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-364-372

## RESEARCH OF BEHAVIOUR OF HIGH-VISCOSITY LIQUID IN TRANSIT IN THE TANKER TANK IN OPERATING TIME OF AUXILIARY SYSTEM OF HEATING

**E. A. Gorbaneva, P. V. Yakovlev**

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

*A huge impact on the heat exchange process between heated cargo tank and enclosing surfaces having the design of the vessel and thermal properties of the cargo (high viscosity fluids). Studies have shown their influence on initial and boundary conditions, which in turn influences the mode of operation of the auxiliary power plant of the vessel. It is proposed to use lightweight perforated horizontal partition, installed parallel to the heaters in the volume of cargo (liquid) tank liquid vessel. Through numerical simulation we studied the behavior of cargo (liquid) during operation of the heating system in the amount of tank liquid to the vessel, given the physical properties of the cargo without partitions and its application. The analysis of temperature fields and fields of velocities. The resulting effect of the application partition on the heights 4, 6 and 7 m, the effect of reducing the installed power of the heaters without increasing the overall weight and cost of retrofitting existing tanks 7–11 %. Adjusting the height of the partitions it is possible to influence the temperature regime of transportation of cargo (liquid) and maintain its temperature within the desired range. The obtained dependences for the heat transfer coefficient lead to the conclusion that effective use of partitions on the mirror of the goods. The efficiency of the use of the partition at a height of 7 m, compared with 3M and is 35 %. The obtained criterion equation allowing to expand the scope of solutions for the heat transfer coefficient at the free surface of the cargo (fluid) that allows easier calculations of heat losses in the calculation of the auxiliary heating system.*

*Keywords: tank bulk vessel, the cargo heating system, numerical simulation of heat transfer processes in the liquid volume of the tank.*

### For citation:

Gorbaneva, Evgenia A., and Pavel V. Yakovlev. "Research of behaviour of high-viscosity liquid in transit in the tanker tank, in operating time of auxiliary system of heating." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 364–372. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-364-372.

УДК 661.21.002.6

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ В ТАНКЕ НАЛИВНОГО СУДНА ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА

**Е. А. Горбанева, П. В. Яковлев**

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,  
Астрахань, Российская Федерация

*Огромное влияние на процесс теплообмена между нагреваемым грузом танка и ограждающими поверхностями оказывает конструкция судна и теплофизические свойства груза (высоковязкой жидкости). Исследования показали их влияние на начальные и граничные условия, что, в свою очередь, оказывает влияние на режим работы вспомогательной энергетической установки судна. Предложено использовать легкую перфорированную горизонтальную перегородку, установленную параллельно подогревателям в объеме груза (жидкости) танка наливного судна. Посредством методов численного моделирования изучено поведение груза (жидкости) во время работы системы подогрева в объеме танка наливного судна, учитывая физические свойства груза без перегородки и при ее применении. Проведен анализ температурных полей и полей скоростей. Получен эффект от применения перегородки на высотах 4, 6 и 7 м. Эффект снижения установленной мощности подогревателей без увеличения общей массы и затрат на переоборудование существующих танков составил 7–11 %. Регулируя высоту расположения перегородки возможно оказывать влияние на температурный режим транспортировки груза (жидкости) и поддерживать ее температуру в необходимом диапазоне. Получено критериальное уравнение, позволяющее расширить область решений, что позволяет облегчить расчеты тепловых потерь при расчете вспомогательной системы подогрева.*

*Ключевые слова: танк наливного судна, система подогрева груза, численное моделирование теплообменных процессов в объеме танка наливного судна.*

**Для цитирования:**

*Горбанева Е. А. Численное исследование поведения высоковязкой жидкости при перевозке в танке наливного судна во время работы вспомогательной системы подогрева / Е. А. Горбанева, П. В. Яковлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 364–372. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-364-372.*

### Введение

В настоящее время грузоперевозчики России составляют 5 % от общего рынка участников перевозок нефти портов России, что становится решающим в выборе стратегии развития отечественных морских и речных транспортных компаний [1]. Увеличение объемов добычи высоковязких нефтепродуктов (жидкостей) как в стране, так и в Астраханском регионе (открытие новых месторождений) выдвигает на первый план способы транспортировки данных жидкостей к местам переработки или потребителю. Учитывая расположение нашего региона, одним из наиболее доступных и дешевых способов транспортировки является водный путь. Географическое и гидрологическое положение региона позволяет транспортировать нефтепродукты наливным флотом. Так как грузы данного рода перевозят в неблагоприятных климатических условиях, то наливные суда для данного рода груза оборудуют двойным бортом, днищем и изолированной палубой. Судно разделено на отсеки — танки, в которые закачивается нефтепродукт. Так как воздействовать на температуру окружающей среды мы не можем, ставится задача воздействия на температурный режим во время транспортировки, а конкретно — на работу вспомогательной системы подогрева судна.

Нефтепродукты, как правило, являются высоковязкими жидкостями. При температуре ниже температуры кристаллизации парафина и органические соединения, входящие в ее состав, затвердевают, и нефть из жидкого состояния переходит в твердое. В течение всего времени оборота судна в перевозимой жидкости поддерживается температура, которая задается технологическими процессами слива и налива. Данное условие легко осуществимо в летний период. В зимний период при значительных понижениях температуры нужен не просто дополнительный обогрев, а порой и перегрев жидкости. Проблема работы систем подогрева для поддержания температурного режима высоковязкой жидкости в заданных технологическом режиме транспортировки пределах напрямую связана с физическими свойствами перевозимой жидкости, и представляется необходимым изучение тепловых потоков внутри транспортируемой жидкости и гидродинамики пограничных слоев. Данный вопрос мало изучен и сложен с точки зрения гидравлики, теплофизики и теплотехники. Изучение данной проблемы затруднено по причине большого разнообразия конструктивного исполнения емкостей, разнообразия и разнонаправленности теплопереноса внутри транспортируемой жидкости.

При проектировании систем подогрева танков наливных судов и в процессе эксплуатации при разработке энергосберегающих мероприятий возникают определенные трудности, связанные со снижением потерь тепловой энергии в окружающую среду. Так как через зеркало свободной поверхности жидкости теплопотери составляют 35 %, очевидна необходимость разработки способов снижения потерь через палубу. Одним из них является изменение структуры потоков груза с разделением высокотемпературных потоков для локального снижения температуры вдоль ограждающих поверхностей. Вместе с тем процессы теплообмена при стационарных режимах работы системы подогрева в танке с позонным подогревом имеют существенные особенности. Однако существующие методики расчета теплоэнергетического оборудования наливных судов не учитывают возможность управления массовыми и тепловыми потоками в объеме груза, что требует проведения исследований с целью их уточнения и дополнения.

Во время работы вспомогательной системы подогрева в объеме жидкости складывается поле температур переменной структуры, которое за счет свободно-конвективных токов внутри

объема наливного танка формирует пограничные слои. Анализ работ, посвящённых аналитическому решению подобных задач, показал необходимость введения ряда допущений, вносящих существенные погрешности. Так, большинство известных теоретических и экспериментальных исследований выполнено для горизонтальных неограниченных слоёв. Среди них можно отметить зависимости, приведённые С. С. Кутателадзе («Основы теории теплообмена») и С. И. Исаевым («Теория теплообмена»).

В танке наливного судна теплообмен существенно сложнее. Это определяется следующими факторами.

1. Ограничением объёма вертикальными поверхностями и прежде всего влиянием на конвективное движение потерь тепла через двойной борт. Охлаждение груза формирует нисходящий поток жидкости вдоль борта, участвующий в общем движении груза в танке.

2. Как правило, в танке используются трубчатые подогреватели, являющиеся, с позиции теплообмена, локальными источниками тепла, от которых формируются восходящие потоки груза. Сложность решения обусловлена формированием восходящих потоков от каждой отдельной трубы, прослеживаемых на расстоянии нескольких десятков диаметров трубы.

3. Взаимодействием нисходящего потока вдоль борта с восходящими потоками, сопровождающимся формированием вихревой зоны с взаимным их перемешиванием.

4. Граничные условия на поверхности зеркала свободной поверхности груза отличаются от классических условий 1-, 2-, или 3-го рода. Теплообмен на поверхности осложнён тем, что:

- циркуляция воздуха под палубой также является свободной конвекцией, определяемой геометрией воздушной прослойки и граничными условиями, и характеризуется значительными изменениями локальных значений коэффициентов теплоотдачи на границах;

- значительные отличия температур поверхностей в воздушном пространстве танка требуют учёта лучистой составляющей;

- набор корпуса судна с позиции теплообмена представляет собой систему рёбер, являющихся тепловыми мостиками;

- сложная геометрия набора приводит к делению воздушного пространства на отдельные ячейки со своими условиями теплообмена.

5. Палуба танкера вносит значительную неопределённость в определение термического сопротивления между палубой и окружающей средой. Изменение направления и скорости ветра, геометрия надстроек, изменение курса, волнение, облачность, осадки и т. д. не позволяют точно установить граничные условия на палубе. Учитывая относительную малость общего вклада этого термического сопротивления целесообразно включать в расчёт худший сценарий на поверхности палубы с граничными условиями 1-го рода.

#### **Численное исследование поведения высоковязких жидкостей во время работы системы подогрева в танке наливного судна**

Проведенный анализ публикаций по данной тематике показал, что огромное влияние на процесс теплообмена оказывает конструкция судна и теплофизические свойства высоковязкой жидкости. Большое разнообразие и значительная сложность конструкций ограждающих поверхностей, совместный перенос тепла конвекцией и теплопроводностью делают расчет теплотерь достаточно сложной и трудоемкой задачей, включающей элементы научного исследования. Методы расчета разрабатываются на основе результатов исследования процессов теплообмена [2] – [6].

В общем режим работы системы подогрева танка состоит из процессов нагрева и поддержания температуры жидкости танка в соответствии с нормами технологического режима. Чем выше вязкость жидкости, тем выше должна быть температура жидкости, при которой она закачивается в танк, температура жидкости в процессе транспортировки тоже будет выше, что служит дополнительной нагрузкой на вспомогательную энергетическую установку. Как уже упоминалось, в объеме груза танка формируется устойчивое течение: от подогревателей горячие слои поднимаются к поверхности жидкости, а холодные слои возле борта за счет работы подогревателей подтягива-

ются в донную область. Таким образом, формируется перегретое зеркало свободной поверхности жидкости. Контактируя с воздушной прослойкой зеркало жидкости отдает тепло, и уже в воздушной прослойке происходит конвективный перенос тепла, осложнённый лучистым теплообменом. В воздушной прослойке формируются отдельные вихри и токи, которые обусловлены наличием рёбер жёсткости палубы.

Для решения задачи снижения потерь тепла через палубу авторы предлагают расположить в объеме жидкости танка новый конструктивный элемент — легкую, проницаемую для жидкости при перегрузочных работах и качке судна, горизонтальную перегородку, которую располагают в объеме жидкости танка параллельно плоскости осей подогревателей. Высота расположения перегородки определяется необходимостью снижения потерь тепла при одновременном повышении средней температуры груза.

Проведенные авторами численные и лабораторные эксперименты позволили выявить значимость влияния и необходимость учета особенности теплообмена при расчете потерь тепла между жидкостью и ограждающими поверхностями танка [7] – [10]. Свободно-конвективное движение груза внутри танка обусловлено поведением изотермического ядра жидкости. Во время работы системы подогрева жидкость, нагретая трубчатыми подогревателями и имеющая меньшую плотность, чем остальная жидкость, за счет действия сил Архимеда поднимается вверх, а жидкость с большей плотностью (остывающая вдоль борта) опускается вниз, что приводит к образованию известных ячеистых течений. Возникающие циркуляционные течения оказывают значительное влияние на картину поведения груза во время процесса транспортировки. Формируется направленное течение груза вдоль зеркала свободной поверхности, в направлении вертикальных охлаждаемых поверхностей, с дальнейшим стеканием груза в придонную область и смещением в зону горячего груза над нагревателями, где груз заново нагревается и поднимется к свободной поверхности с дальнейшим движением вдоль нее в направлении вертикальных охлаждаемых поверхностей. В процессе данного свободно-конвективного движения груза формируется высокотемпературное ядро груза, внутри которого температура меняется крайне незначительно.

Основная масса жидкости представляет практически изотермическое ядро, и лишь вблизи вертикальных, наклонных и горизонтальных поверхностей наблюдается слой с существенным градиентом температуры. Это необходимо учитывать при расчете потерь тепла в танке. Добавленный конструктивный элемент в виде горизонтальной перфорированной перегородки над нагревателями влияет на указанное распределение температур, изменяя тепловой поток от зеркала свободной поверхности груза. Очевидно, что высота расположения перегородки над нагревателями влияет на потери тепла через палубу и температурное поле ядра груза под перегородкой. Оценка влияния горизонтальной перегородки на работу системы подогрева и является целью настоящего исследования.

Сложность геометрии танка и системы подогрева, зависимость параметров груза от температуры, влияние лучистого теплообмена позволяют получить решение задачи, используя численные методы. Система исходных дифференциальных уравнений (1) – (3) включает в себя уравнения Навье–Стокса, уравнение сплошности и уравнение энергии (сложность решения для условий свободноконвективного движения заключается во взаимном влиянии процессов теплообмена и движения груза):

$$\frac{d\bar{w}}{d\tau} = -g\beta\Delta t - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где  $w$  — скорость, м/с;  $\tau$  — время, с;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  — коэффициент объёмного расширения, К<sup>-1</sup>;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  — давление, Па;  $x, y, z$  — координаты, м;  $a$  — коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Система уравнений дополняется условиями однозначности — начальными и граничными условиями:

– начальные условия:  $t(x, 0) = t_0; 0 \leq x \leq H$ ;

– граничные условия для перегородки:  $\left. \frac{\partial t_1(H, \tau)}{\partial y} \right|_{y=H} = \left. \frac{\partial t_2(H, \tau)}{\partial y} \right|_{y=H}, t_1(H, \tau) = t_2(H, \tau)$ ;

– граничные условия для борта и днища соответственно:

$$k_{\text{днища}}(t_{\text{нп}} - t_{\text{зв}}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}; k_{\text{борт}}(t_{\text{нп}} - t_{\text{зв}}) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x},$$

где  $t_1(H, \tau)$  — температура на нижней поверхности перегородки, °С;  $t_2(H, \tau)$  — температура на верхней поверхности перегородки, °С;  $k_{\text{днища}}, k_{\text{борт}}$  — коэффициенты теплопередачи через двойные днище и борт, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности нефтепродукта, Вт/(м·°С);  $t_{\text{нп}}$  — температура нефтепродукта, °С;  $t_{\text{зв}}$  — температура забортной воды, °С.

Тепловой поток в направлении соседних танков (по направлению  $z$ ) не учитывался, так как в большинстве случаев температуры в соседних танках близки и тепловые потоки через стенки смежных танков считаются равными  $q = 0$ . Отдельным классом задач можно считать расчёт танка речного судна без продольной переборки. В этом случае граничные условия по оси танка устанавливаются по условию «симметрия», т. е. касательные напряжения в жидкости на оси симметрии принимаются

$$\tau = -\mu \frac{\partial w}{\partial x} = 0,$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\tau$  — касательные напряжения, н/м<sup>2</sup>.

Экспериментальные исследования показали наибольшую эффективность непроницаемой перегородки. Вместе с тем выполнение перегрузочных операций, переливы нефтепродукта при качке требуют определённой доли проницаемости, легко реализуемой системой клапанов, нормально закрытых в условиях отсутствия качки. В расчёте принято непроницаемое состояние клапанов.

Как показали исследования ряда авторов (А. З. Щербаков, Н. В. Селиванов), локальное изменение вязкости, например, около трубчатых подогревателей, оказывает существенное влияние на движение высоковязких жидкостей. В связи с этим, как отмечалось ранее, для свободно-конвективного движения крайне важно учитывать взаимозависимость плотности и вязкости от температуры, что и реализовано в численной модели. На рис. 1 представлена расчётная модель танка наливного судна.

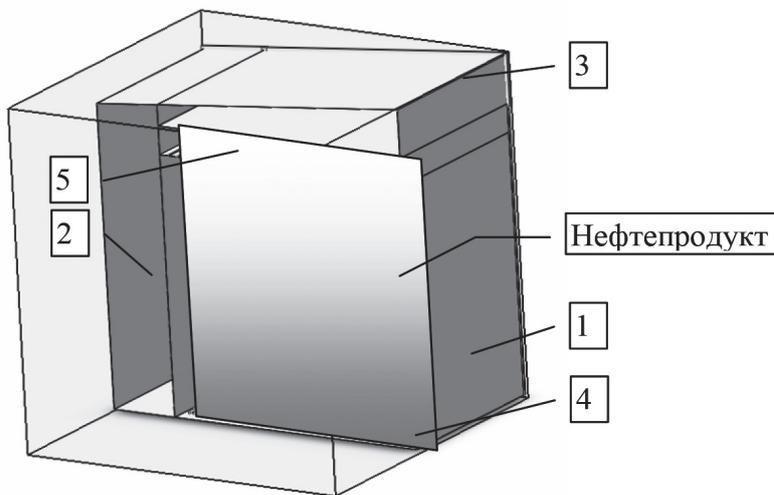


Рис. 1. Модель танка наливного судна (в разрезе):

1 — танк; 2 — двойной борт; 3 — палуба; 4 — система трубчатых подогревателей; 5 — горизонтальная перегородка

Способ разбивки модели сеткой определялся из условия сходимости решения и зависел от степени детализации модели и соотношения размеров элементов танка и теплотехнического оборудования как наиболее мелких элементов расчётной схемы. В решениях использовалась неравномерная сетка с уменьшением размера ячеек в угловых зонах и на гранях элементов танка. Пример разбивки приведён на рис. 2.

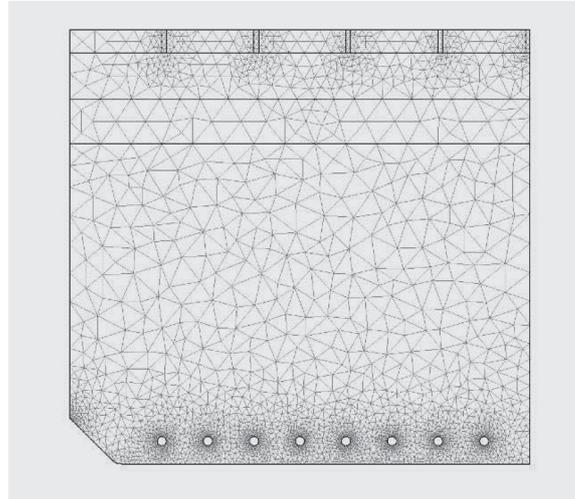
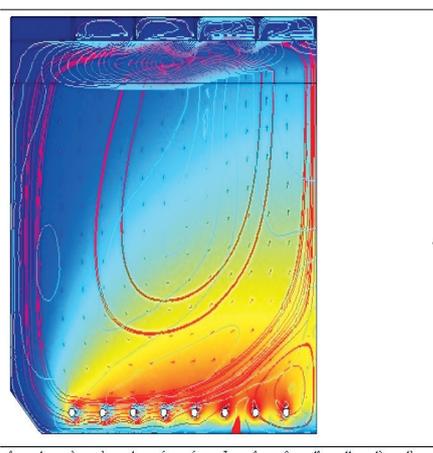


Рис. 2. Расчётная сетка

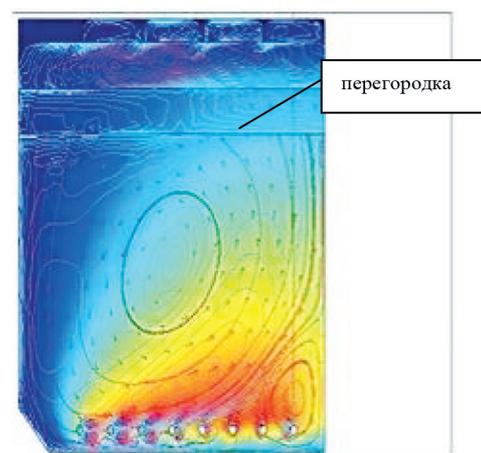
Основные закономерности работы систем подогрева танка можно проиллюстрировать общим видом полей скорости и температур нефтепродукта и воздуха между палубой и зеркалом свободной поверхности. На рис. 3, а представлен результат расчёта без горизонтальной перегородки над нагревателями. Как видно из поля температур, над нагревателями прослеживаются чётко выраженные восходящие струйки нефтепродукта, причиной появления которых является сочетание двух факторов: первый — разогрев нефтепродукта около подогревателя со снижением его плотности (появление сил Архимеда); второй — разогретый нефтепродукт обладает меньшей вязкостью, а, следовательно, именно в зоне теплового следа трубчатого подогревателя силы трения минимальны.

а)



ширина танка, м

б)



ширина танка, м

Рис. 3. Поля скоростей и температур в объеме танка:  
 а — без перегородки; б — с перегородкой ( $H_{\text{перег}} = 7 \text{ м}$ )

Разогретый нефтепродукт «всплывает» к зеркалу свободной поверхности, повышая его температуру, что способствует росту потерь тепла.

Еще один фактор, влияющий на движение нефтепродукта,— присутствие холодного борта. Остывающий нефтепродукт вдоль борта опускается вниз к подогревателям, отклоняя восходящие струи от вертикали. Взаимное влияние этих двух факторов объясняет интенсивную циркуляцию нефтепродукта в танке. Похожие процессы происходят в воздушной прослойке между палубой и зеркалом груза. Расчёт этого участка танка осложнён неправильной геометрией расчётной зоны, наличием тепловых мостиков (стальных рёбер жёсткости палубы) и лучистым теплообменом, учётных в расчёте.

На рис. 3, б представлена аналогичная схема с добавленной горизонтальной перегородкой над нагревателями. Расчёты дали прогнозируемый результат использования перегородки. Восходящие потоки разогретого нефтепродукта не дошли до зеркала свободной поверхности груза, а циркуляция в верхней части танка уменьшилась. Как показали расчёты, произошло снижение потерь тепла при росте средней температуры ядра транспортируемого груза. Приведённые на рис. 4 поля скоростей подтверждают сделанные выводы относительно особенностей характера движения груза в танке.

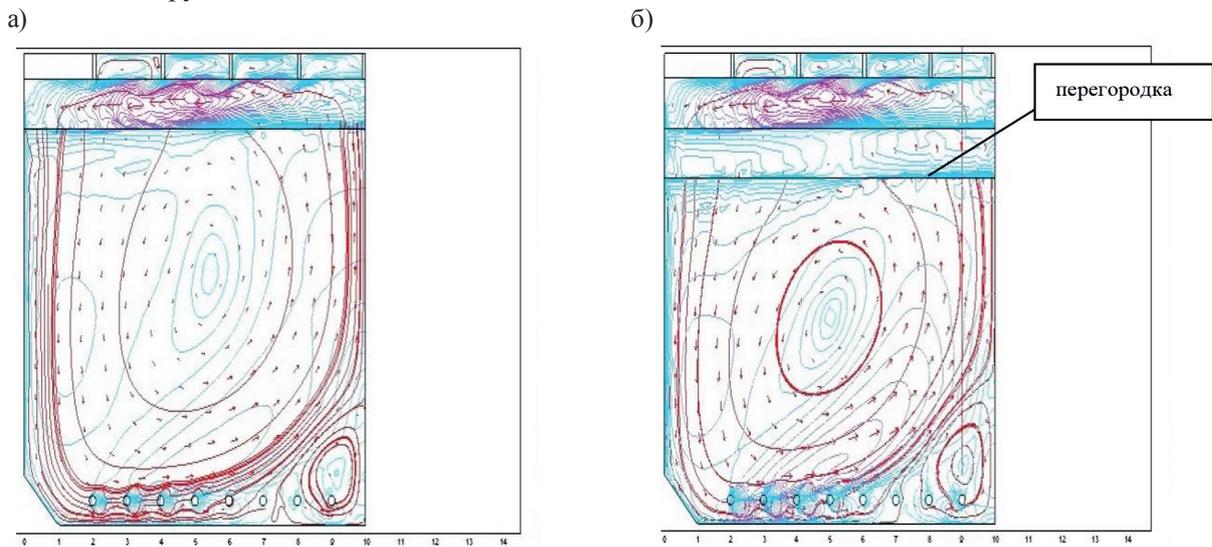


Рис. 4. Поле скорости в танке:  
а — без перегородки; б — с перегородкой ( $H_{\text{пер}} = 7$  м)

### Выводы

Обработка полученных результатов расчётов производилась с использованием методов теории подобия, в результате для расчёта коэффициента теплопередачи через палубу получено критериальное уравнение

$$Nu = 2Ra^{0,6014} \cdot (-0,05H^3 + 0,4H^2 - 0,7H + 1,4), \quad (4)$$

где  $Nu$  — число Нуссельта;  $Ra$  — число Рэлея;  $H$  — относительная высота расположения перегородки над нагревателями,  $H = H_{\text{пер}} / H_{\text{взлива}}$ ;  $H_{\text{пер}}$  — высота расположения перегородки над нагревателями, м;  $H_{\text{взлива}}$  — взлив (уровень нефтепродукта в танке), м. Определяющий размер — высота смоченной части ограждающей поверхности танка, определяющая температура — средняя температура нефтепродукта.

Полученные авторами результаты позволили сделать выводы о возможности снижения потерь тепла от разогретого нефтепродукта через палубу, при размещении легкой горизонтальной перегородки над трубчатыми подогревателями. Общее расчётное снижение потерь тепла и потребной мощности систем подогрева танка составляет 7 – 11 %. Полученное обобщающее критериальное уравнение может быть использовано для расчёта потерь тепла от разогретых высоковязких нефтепродуктов (мазотов) в танках и топливных цистернах судов. Получен эффект от при-

менения перегородки на высотах 4, 6 и 7 м. Регулируя высоту расположения перегородки, можно оказывать влияние на температурный режим транспортировки груза (жидкости) и поддерживать ее температуру в необходимом диапазоне.

Расчёты показали возможность и целесообразность позонного разделения грузового и воздушного пространства топливных танков для снижения потерь тепла и гибкого управления работой систем подогрева для снижения затрат на поддержание температур нефтепродуктов, что может быть предметом дальнейших исследований. В перспективе работа может быть продолжена в направлении учёта особенностей теплообмена в условиях качки. Отдельным вопросом является получение данных по качке судна. В существующих теоретических и экспериментальных работах до настоящего времени используется допущение о гармоническом законе и учитывается, как правило, только бортовая качка судна. Это не совсем совпадает с реальной ситуацией. Построение модели с динамической сеткой позволяет смоделировать движение судна на волне, в том числе учесть перелив воды через палубу, характерный для танкеров. Влияющими параметрами судна являются длина, ширина, высота борта, осадка и метацентрическая высота судна, геометрия палубы, носовой оконечности, в том числе современные обводы, применяемые при строительстве судов обеспечения нефтяных платформ и последних проектов военных кораблей, снижающих сопротивление движению судна на волнении. Среди стандартных параметров волны, таких как длина, высота, скорость движения судна относительно фронта волны и курс, должна быть учтена несимметричность, обусловленная ветровым воздействием, а в перспективе — интерференция волн.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердина М. Ю. Морской транспорт в системе международных бизнес-операций / М. Ю. Бердина, Е. К. Торосян // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1-1. — С. 558–560.
2. Яковлев П. В. Транспортировка высоковязких жидкостей с подогревом в танках наливного судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 38–44.
3. Яковлев П. В. Исследование влияния конструктивных особенностей танков наливных судов на процессы тепломассообмена при перевозке высоковязких грузов водным транспортом / П. В. Яковлев, Ю. А. Аляутдинова, Е. А. Горбанева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2009. — № 2. — С. 99–103.
4. Моисеев В. И. Теория и модели процессов тепломассопереноса при транспортных операциях с застывающими наливными грузами: дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Моисеев. — СПб., 2012. — 463 с.
5. Моисеев В. И. Естественная конвекция горячих нефтепродуктов при перевозках в условиях низких температур / В. И. Моисеев // Математика в вузе: труды XXII Междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: ПГУПС, 2010. — С. 132–136.
6. Головчун С. Н. Моделирование тепломассопереноса в судовых системах подогрева высоковязких топлив и жидких грузов: дис. ... канд. техн. наук / С. Н. Головчун. — Астрахань, 2010. — 135 с.
7. Яковлев П. В. Моделирование процессов тепломассообмена при перевозке высоковязких грузов водным транспортом / П. В. Яковлев, Ю. А. Аляутдинова, Е. А. Горбанева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2009. — № 2. — С. 104–109.
8. Пат. 104542 Российская Федерация, МПК В 65 D 88/74. Устройство для снижения теплопотерь от разогретой жидкости в танках судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева, Ю. А. Аляутдинова, Н. Б. Ачилова; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АГТУ. — № 2010150226/12; заявл. 07.12.2010; опубл. 20.05.2011; бюл. № 14.
9. Пат. № 130595 Российская Федерация, МПК В 65 D 88/74. Устройство для снижения теплопотерь от разогретой жидкости в танках судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева, Ю. А. Аляутдинова; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АГТУ. — № 2012157889/12; заявл. 27.12.2012; опубл. 27.07.2013; бюл. № 21.
10. Пат. № 154604 Российская Федерация, МПК В 65D 88/74. Устройство для снижения теплопотерь от разогретой жидкости в танках судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АГТУ. — № 2015105857/12; заявл. 19.02.2015; опубл. 27.08.2015; бюл. № 24.

## REFERENCES

1. Berdina, M. Yu., and E. K. Torosyan. "Maritime transport in international business operations." *Modern problems of science and education* 1-1 (2015): 558–560.
2. Yakovlev, Pavel Viktorovich, and Evgeniya Aleksandrovna Gorbaneva. "Transportation of highly viscous liquids in the heated tankers." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 38–44.
3. Yakovlev, Pavel Viktorovich, Yulia Amirovna Alyautdinova, and Evgeniya Aleksandrovna Gorbaneva. "Research of influence of structural features of tanks of oil tankers on the processes of heat-mass exchange at transportation of high-viscosity loads by water transport." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2009): 99–103.
4. Moiseev, V. I. *Teoriya i modeli processov teplomassoperenosa pri transportnyh operacijah s zastvyajushhimi nalivnymi gruzami*. Dr. diss. SPb., 2012.
5. Moiseev, V. I. "Estestvennaja konvekcija gorjachih nefteproduktov pri perevozkah v uslovijah nizkih temperature." *«Matematika v vuze»: tr. XXII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii*. SPb.: PGUPS, 2010. 132–136.
6. Golovchun, S. N. *Modelirovanie teplomassoperenosa v sudovyh sistemah podogreva vysokovjazkih topliv i zhidkih gruzov*. PhD diss. Astrahan', 2010.
7. Yakovlev, Pavel Viktorovich, Yulia Amirovna Alyautdinova, and Evgeniya Aleksandrovna Gorbaneva. "Design of processes of heat-mass transfer while transportation of high-viscosity loads by water." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2009): 104–109.
8. Jakovlev, P. V., E. A. Gorbaneva, Ju. A. Aljautdinova, and N. B. Achilova. RU 104 542 U1, IPC B 65 D 88/74. *Ustrojstvo dlja snizhenija teplopoter' ot razogretoj zhidkosti v tankah sudna*. Russian Federation, assignee. 20 May 2011.
9. Jakovlev, P. V., E. A. Gorbaneva, and Ju. A. Aljautdinova. RU 130 595 U1, IPC B 65 D 88/74. *Ustrojstvo dlja snizhenija tep-lopoter' ot razogretoj zhidkosti v tankah sudna*. Russian Federation, assignee. 27 July 2013.
10. Jakovlev, P. V., and E. A. Gorbaneva. RU 154 604 U1, IPC B 65 D 88/74. *Ustrojstvo dlja snizhenija tep-lopoter' ot razogretoj zhidkosti v tankah sudna*. Russian Federation, assignee. 27 Aug. 2015.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горбанева Евгения Александровна** — аспирант  
*Научный руководитель:*

Яковлев Павел Викторович  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный  
технический университет»  
414056, Российская Федерация, Астрахань,  
ул. Татищева, 16  
e-mail: [eugene-astra@rambler.ru](mailto:eugene-astra@rambler.ru)

**Яковлев Павел Викторович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный  
технический университет»  
414056, Российская Федерация, Астрахань,  
ул. Татищева, 16  
e-mail: [zvs01jak@rambler.ru](mailto:zvs01jak@rambler.ru)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Gorbaneva, Evgenia A.** — Postgraduate  
*Supervisor:*

Yakovlev, Pavel V.  
Astrakhan State Technical University  
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,  
Russian Federation  
e-mail: [eugene-astra@rambler.ru](mailto:eugene-astra@rambler.ru)

**Yakovlev, Pavel V.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Astrakhan State Technical University  
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,  
Russian Federation  
e-mail: [zvs01jak@rambler.ru](mailto:zvs01jak@rambler.ru)

*Статья поступила в редакцию 26 декабря 2016 г.  
Received: December 26, 2016.*