

*П. В. Яковлев, Е. А. Горбанёва*

## ТРАНСПОРТИРОВКА ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ С ПОДОГРЕВОМ В ТАНКАХ НАЛИВНОГО СУДНА

Проведены теоретические и экспериментальные исследования теплообменных процессов в объеме наливного танка при перевозке высоковязких жидкостей на экспериментальной установке, в масштабе моделирующей поведение груза в танке наливного судна. Модель была изолирована, имела подогреватели в нижней части и горизонтальную легкую проницаемую перегородку в объеме жидкости ниже свободной поверхности. При обработке полученных результатов применялась теория подобия и методы численного моделирования. Изучено поведение жидкости при использовании легкой проницаемой горизонтальной перегородки у свободной поверхности, формирование полей давлений и температур в объеме танка. Предложена методика расчета теплообменных процессов и получены критерияльные уравнения. Разработана методика расчета энергоэффективного исполнения танка с помощью определения толщины зазора между свободной поверхностью и легкой горизонтальной перегородкой, изучены прочностные характеристики легкой перегородки, даны советы по ее устройству.

**Ключевые слова:** конвекция, скорость, температура, танк.

### **Введение**

С развитием химической, нефтехимической, пищевой и других отраслей промышленности в Прикаспийском регионе резко увеличивается поток грузов, перевозимых водным и морским транспортом. Среди грузов, транспортировка которых связана со значительным энергопотреблением, можно отметить такие высоковязкие нефтепродукты, как мазут и сырая нефть [1].

Разгрузка (слив) и загрузка высоковязких жидкостей на пунктах приема имеют свои особенности. Продукт при длительной транспортировке, даже в летних условиях, охлаждается до температуры, которая затрудняет слив груза на пункте разгрузки, что ведет к потере качества, количества и рентабельности сбыта продукта [2]. От выбранной операции (загрузка или разгрузка) зависит величина потерь продукции, сохранность качества, экологическая безопасность, эксплуатационные затраты и технико-экономические показатели.

После отгрузки основной части продукта на стенках и днище танка остается застывший слой продукта, удаление которого сложно, требует больших затрат, а порой экологически небезопасно. Необходим высококвалифицированный подход к данной операции.

Как правило, наливные суда изначально оборудуются специальными системами подогрева груза с целью уменьшения его вязкости и обеспечения необходимой производительности погрузки и выгрузки, а технологическая схема транспортировки включает в себя, помимо прочего, операции подогрева продуктов в резервуарах перед погрузкой и предварительного подогрева в танках судна до выгрузки и в ее процессе. Эти системы компенсируют теплотери, позволяя решать технологическую задачу стабилизации температуры груза. Однако проблема снижения затрат на перевозку остается актуальной.

Решением проблемы может стать перевозка в изотермических цистернах. Изотермические цистерны и танки наливных судов значительно дороже и сложнее в эксплуатации, т. к. возникает проблема коррозии в скрытых полостях. Изотермическая ёмкость должна быть заложена в проект транспортного средства изначально, поэтому значительное число существующих судов или просто не могут быть переоборудованы подобным образом, или это будет нерентабельно.

Таким образом, устройство для перевозки должно иметь высокоэффективную изоляцию или должно быть оборудовано устройством для подогрева груза в пути следования, или его подогрев необходимо произвести на пункте разгрузки. В связи с этим в числе актуальных проблем – выбор условий работы теплового оборудования в период рейса, расчет температурных режимов транспортировки продуктов и разработка технологического режима транспортировки. Решение этих проблем поможет создать оборудование, обеспечивающее положительные условия транспортировки и хранения высоковязких жидкостей.

### Моделирование теплообмена между зеркалом свободной поверхности и палубой в танке наливного судна

Известно, что потери тепла через палубу составляют 35–38 %. Данная проблема приводит к удорожанию всего технологического режима транспортировки. Снижение потерь тепла за счет оптимизации технологического режима транспортировки и расчета длительности отдельных операций с учетом теплового состояния судна помогает решить задачу снижения энергозатрат без существенных изменений в конструкции танка судна и теплоэнергетического оборудования [3, 4].

Проектирование теплового ограждения или систем подогрева требует определенной информации о теплотехнических качествах изоляционных материалов и процессах теплообмена, происходящих в жидком продукте, и, в частности, о влиянии переменных погодных условий и солнечной радиации на темп охлаждения [5].

Нами были проведены экспериментальные испытания на установке (рис. 1), моделирующей поведение груза в танке наливного судна между зеркалом свободной поверхности и палубой при применении легкой проницаемой горизонтальной перегородки. Модель была изолирована, имела подогреватели в нижней части и легкую проницаемую горизонтальную перегородку в объеме жидкости ниже свободной поверхности.

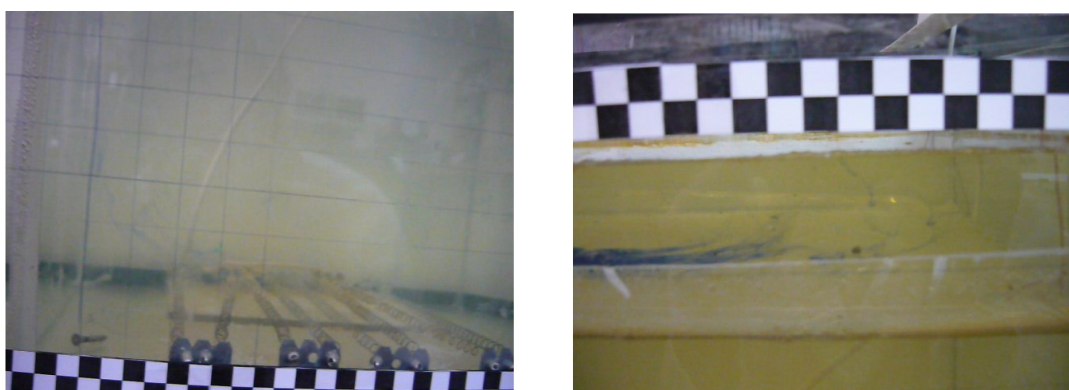


Рис. 1. Экспериментальная установка

Для наглядности использовалась жидкость синего цвета.

Была получена схема распределения тепловых потоков между палубой и грузом в танке наливного судна (рис. 2).

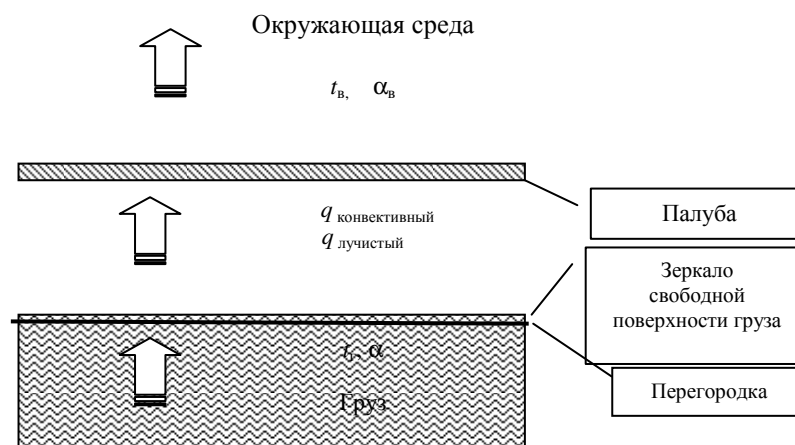


Рис. 2. Расчетная схема палубы

При обработке результатов исследования применялась теория подобия и методы численного моделирования. Для удобства практического использования предложенных критериальных зависимостей определяющим размером была принята высота взлива жидкости в танке [2], а определяющей температурой – средняя температура жидкости в танке:

– начальные условия:

$$t(x, 0) = t_0, 0 \leq x \leq H,$$

$$t(x, H) = t_H, H \leq x \leq H_{\text{вз}};$$

– граничные условия:

$$\left. \frac{\partial t_1(H, \tau)}{\partial x} \right|_{x=H} = \left. \frac{\partial t_2(H, \tau)}{\partial x} \right|_{x=H};$$

$$t_1(H, \tau) = t_2(H, \tau);$$

$$t(0, \tau) = \varphi_1(\tau);$$

$$t(H_{\text{вз}}, \tau) = \varphi_2(\tau).$$

$$\text{Тогда } \frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \lambda \frac{\partial t}{\partial x} = k(t_c - t_{\text{ср}}).$$

В ходе расчетов были применены основные уравнения теплопроводности (Навье – Стокса, Фурье) [6]. Уравнение Навье – Стокса по оси  $x$ :

$$\rho \frac{dw_x}{d\tau} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) = \rho g_x - \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{2 \cdot \Delta x} +$$

$$+ \mu \left( \frac{w_{i+1,j,k} + w_{i-1,j,k} - 2w_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} + \frac{w_{i,j+1,k} + w_{i,j-1,k} - 2w_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} + \frac{w_{i,j,k+1} + w_{i,j,k-1} - 2w_{i,j,k}}{(\Delta z)^2} \right).$$

По другим осям уравнение рассчитывается аналогично.

Основное уравнение энергии:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p} =$$

$$= \left( \frac{t_{i+1,j,k} + t_{i-1,j,k} - 2t_{i,j,k}}{(\Delta x)^2} + \frac{t_{i,j+1,k} + t_{i,j-1,k} - 2t_{i,j,k}}{(\Delta y)^2} + \frac{t_{i,j,k+1} + t_{i,j,k-1} - 2t_{i,j,k}}{(\Delta z)^2} \right) + \frac{q_v}{\rho c_p}.$$

Балансовое уравнение плотности тепловых потоков имеет вид

$$q_{\Gamma} = q_{\text{СТ}} = q_{\text{конв}} + q_{\text{луч}} + q_{\text{тепл.мостик}} = q_B. \quad (1)$$

Расчетная формула теплового баланса (1) для этого случая представляется уравнением

$$\alpha_{\Gamma} (t_{\text{ядра}} - t_{\text{зерк}}) =$$

$$= \sum \frac{\lambda_i}{\delta_i} (t_{i+1} - t_i) = \frac{t_{\text{зерк}} - t_{\text{палуба}}}{\delta} + \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{зерк}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{палуба}}}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= \alpha_{\text{возд}} (t_{\text{пов.палуба}} - t_{\text{возд}}).$$

При ламинарном режиме течения жидкости пользуются выражением

$$\text{Nu}_{\text{ж,х}} = - \frac{\Theta'(0)}{\sqrt{2}} \text{Gr}_{\text{ж,х}}^{0,25} = C \cdot \text{Ra}_{\text{ж,х}}^{0,25}, \quad (2)$$

где  $\Theta'(0)$  – безразмерный градиент температуры на стенке;  $C$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа  $\text{Pr}$ . Коэффициент теплоотдачи от жидкости к зеркалу ее свободной поверхности при числах  $\text{Ra} > 10^5$ , используя (2), можно найти по известному критериальному уравнению [7]:

$$Nu = 0,085 \cdot C \cdot Ra^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

где  $C$  – коэффициент, учитывающий наличие зеркала свободной поверхности,  $C = 0,4$ .

Использование численных методов [3], (2) и (3) при обработке экспериментальных данных и решении поставленной задачи позволило получить следующее уравнение:

$$Nu = 2 \cdot Ra^{0,6014} . \quad (4)$$

При использовании методов численного моделирования были получены также модели поведения груза в танке без перегородки (рис. 3, *а*) и с перегородкой (рис. 3, *б*), которые наглядно подтверждают экспериментальные данные.

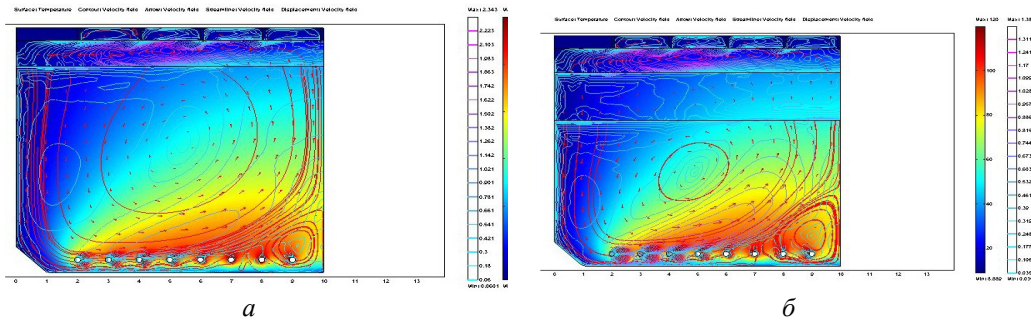


Рис. 3. Модель танка: *а* – без перегородки; *б* – с перегородкой

Модели на рис. 4 позволяют определить распределение температур и скоростей в модели без перегородки и с перегородкой.

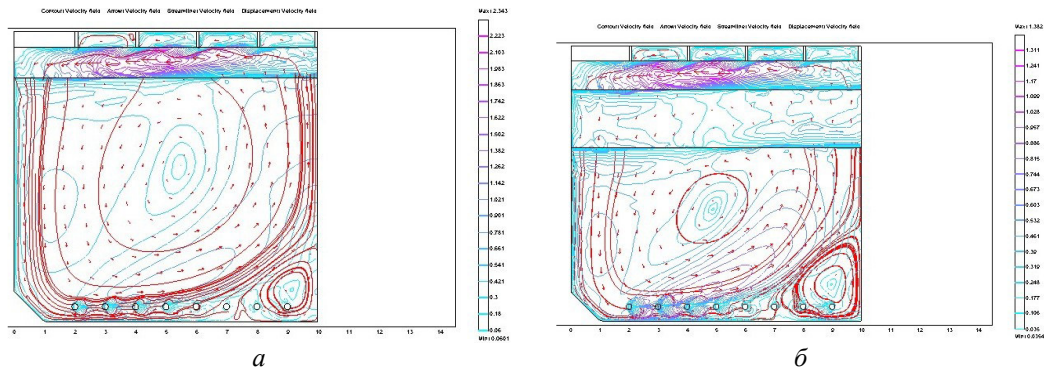


Рис. 4. Поля температур и скоростей в модели танка: *а* – без перегородки; *б* – с перегородкой

Были получены следующие графики распределения давления в модели с перегородкой (рис. 5).

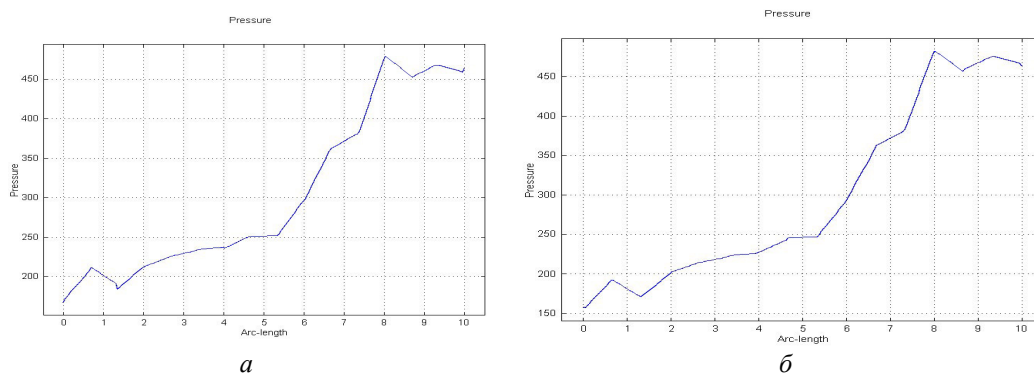


Рис. 5. Графики распределения давления: *а* – над перегородкой; *б* – под перегородкой

Согласно результатам расчетов, вертикальная нагрузка на перегородку составляет  $50 \text{ Н/м}^2$  и позволяет сделать перегородку в форме полимерной растяжки, которая имеет практически нулевое сопротивление и перфорации.

Результаты нашего исследования удовлетворительно согласуются с данными [2], уравнение (4) существенно расширяет область применения решений для нахождения коэффициента теплоотдачи у свободной поверхности жидкости, что существенно облегчает расчеты тепловых потерь в процессе транспортировки и позволяет получить экономию энергоресурсов 8–10 %.

Термическое сопротивление воздушной прослойки при  $Ra > 10^7$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ , может быть найдено по закону Фурье с использованием эффективного коэффициента теплопроводности [7, 8]:

$$\lambda_3 = \lambda \cdot \varepsilon,$$

где  $\varepsilon = 0,22 \cdot Ra^{\frac{1}{4}}$ .

Тогда термическое сопротивление может быть найдено как  $R = \frac{\delta}{\lambda_3}$ .

Так как промежуточные значения температуры газового объема, зеркала свободной поверхности и поверхности палубы неизвестны, то

$$q = \frac{t_r - t_{\text{возд}}}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\frac{\Psi_{\text{палубы}}}{R_{\text{возд}}} + \varepsilon C_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{зерк}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{пов.палубы}}}{100} \right)^4 \right] \sqrt{(t_{\text{зерк}} - t_{\text{пов.палубы}})}} + \frac{1}{\alpha_{\text{возд}}}}.$$

Порядок расчета включает задание неизвестных значений температуры зеркала свободной поверхности жидкости и поверхности палубы, после чего по балансовым уравнениям выполняется уточнение их значений и расчеты, при необходимости, повторяются для достижения необходимой точности.

На основании полученных данных возможен расчет конструктивных параметров и режимов работы элементов судового энергетического оборудования с учетом применения предложенного энергосберегающего конструктивного элемента – горизонтальной проницаемой перегородки.

Тепловая нагрузка на систему подогрева определяется по следующей зависимости:

$$Q_{\text{пл}} = Q_{\text{пот}} + Q_{\text{н}},$$

где  $Q_{\text{пл}}$  – мощность подогревателя, кВт;  $Q_{\text{пот}}$  – потери тепловой энергии от жидкости в окружающую среду через ограждающие поверхности емкости, кВт;  $Q_{\text{н}}$  – расход тепловой энергии на подогрев жидкости, кВт.

Мощность подогревателя определяется по формуле

$$Q_{\text{пл}} = K_{\text{пл}} \cdot F_{\text{пл}} (t_{\text{п}} - t_{\text{н}}) 10^{-3},$$

где  $K_{\text{пл}}$  – коэффициент теплопередачи подогревателя,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F_{\text{пл}}$  – поверхность подогревателя,  $\text{м}^2$ ;  $t_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{н}}$  – температура конденсации пара и температура жидкости соответственно.

Расход тепловой энергии на подогрев жидкости

$$Q_{\text{н}} = c_{\text{н}} \cdot M_{\text{н}} \frac{t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}}}{\tau_{\text{под}}}.$$

Поверхность подогревателя,  $\text{м}^2$ , определяется по формуле

$$F_{\text{пл}} = \frac{Q_{\text{пл}} + Q_{\text{н}}}{K_{\text{пл}} (t_{\text{п}} - t_{\text{н}})} 10^3.$$

Для определения поверхности подогревателя необходимо также знать коэффициент теплопередачи  $K_{пл}$ . В качестве теплоносителя в подогревателях чаще всего используется водяной пар, и коэффициент теплопередачи  $K_{пл}$  определяется в основном коэффициентом теплообмена от трубы подогревателя к жидкости, т. к. коэффициент теплообмена от конденсирующего пара к трубе подогревателя на 2 порядка выше, чем со стороны жидкости.

### Заключение

Таким образом, в результате исследований:

- получены критериальные уравнения и предложена методика расчета тепломассообменных процессов при транспортировке высоковязких застывающих жидкостей наливными судами;
- разработана методика расчета энергоэффективного исполнения танка с помощью определения толщины зазора между легкой проницаемой перегородкой, установленной под зеркалом свободной поверхности, в объеме жидкости над подогревателями; изучены прочностные характеристики легкой перегородки и даны советы по ее устройству;
- предложены методики расчета конструктивных параметров и режимов работы элементов судового энергетического оборудования, с учетом применения предложенных энергосберегающих конструктивных особенностей; исследован процесс теплообмена при использовании легкой проницаемой горизонтальной перегородки и предложена методика расчета теплового баланса, расчета сопротивления и прочностной характеристики перегородки; приведен расчет количества энергии на подогрев жидкости и расчет поверхности подогревателя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Морской образовательный портал* // URL: <http://www.moryak.biz/modules.php/name>.
2. *Щербаков А. З.* Транспорт и хранение высоковязких нефтей и нефтепродуктов с подогревом: дис. ... д-ра техн. наук / А. З. Щербаков, 1979.
3. *Антипов В. И.* Разработка методов решения задач с подвижной границей и применение его к некоторым вопросам транспорта и хранения нефти: дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Антипов. М., 1969.
4. *Исследование теплообмена при горячеструйном подогреве нефтепродуктов в танках танкера.* Отчет по НИР. Астрахань: Рыбвтуз, 1975.
5. *Исследования и расчеты теплотерь в нефтеналивных судах: материалы Всесоюз. конф. по совершенствованию технических средств нефтеперевозок.* Астрахань: Волга, 1968.
6. *Шлихтинг Х.* Теория пограничного слоя / Х. Шлихтинг. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 528 с.
7. *Кутателадзе С. С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление / С. С. Кутателадзе. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
8. *Коздоба Л. А.* Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л. А. Коздоба. М.: Наука, 1975. 228 с.

Статья поступила в редакцию 02.07.2015,  
в окончательном варианте – 14.07.2015

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Яковлев Павел Викторович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и гидромеханика»; zvs01jak@rambler.ru.

**Горбанёва Евгения Александровна** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и гидромеханика»; eugine-astra@rambler.ru.



P. V. Yakovlev, E. A. Gorbaneva

## TRANSPORTATION OF HIGHLY VISCOUS LIQUIDS IN THE HEATED TANKERS

**Abstract.** The theoretical and experimental studies of heat and mass transfer processes in the volume of the liquid tank during the transportation of high-viscosity liquids in a pilot plant, like a model of the behaviour of the cargo in the tank of the liquid vessel, are made. The model was isolated and had heaters at the bottom and horizontal light permeable wall in the volume of liquid below the free surface. When processing the results, the theory of similarity and the methods for the numerical simulation were used. The behaviour of the liquid while using the light permeable horizontal wall at the free surface and the formation of the pressure and temperature ranges in the tank were studied. The methods of calculation of the heat and mass transfer processes are proposed and the criterial equations are received. The method of calculation of the energy efficient performance of the tank, using the definition of the thickness of the gap between the outer side and the light wall, is developed, the strength characteristics of the light wall is examined and some advice on its structure is given.

**Key words:** convection, speed, temperature, tank.

### REFERENCES

1. Available at: <http://www.moryak.biz/modules.php/name>.
2. Shcherbakov A. Z. *Transport i khraneniye vysokoviazkikh neftei i nefteproduktov s podogrevom: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Transportation and storage of high viscous oil and oil products with heating. Dis. Dr. tech. sci.]. 1979.
3. Antipov V. I. *Razrabotka metodov resheniya zadach s podvizhnoi granitse i primeneniye ego k nekotorym voprosam transporta i khraneniya nefti: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of the methods of solution of the tasks with movable border and its application to some issues of transportation and storage of oil. Dis. cand. tech. sci.]. Moscow, 1969.
4. *Issledovanie teploobmena pri goriachestruinom podogreve nefteproduktov v tankakh tankera. Otchet po NIR* [Study of the heat exchange at hot stream heating of oil products in the tankers. Report on scientific research work]. Astrakhan, Rybvtuz, 1975.
5. *Issledovaniya i raschety teplopoter' v neftenalivnykh sudakh. Materialy Vsesoiuznoi konferentsii po sovershenstvovaniyu tekhnicheskikh sredstv neftepervezok* [Studies and calculations of heat losses in the oil tankers. Proceedings of the All-Russian conference on improvement of the technical means of oil transportation]. Astrakhan, Volga Publ., 1968.
6. Shlikhting Kh. *Teoriya pogranichnogo sloia* [Theory of border layer]. Moscow, Izdatel'stvo inostrannoi literatury Publ., 1956. 528 p.
7. Kutateladze S. S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivleniye* [Heat transfer and hydrodynamic resistance]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 367 p.
8. Kozdoba L. A. *Metody resheniya nelineinykh zadach teploprovodnosti* [Methods of solution of non-linear tasks of heat conductivity]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 228 p.

The article submitted to the editors 02.07.2015,  
in the final version – 14.07.2015

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Yakovlev Pavel Viktorovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences; Professor; Professor of the Department "Life Security and Hydromechanics"; zvs01jak@rambler.ru.

**Gorbaneva Evgeniya Aleksandrovna** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Senior Lecturer of the Department "Life Security and Hydromechanics"; eugine-astra@rambler.ru.

