

ИЗМЕНЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ИНЕРТИЗАЦИИ ТАНКЕРА ЗА СЧЕТ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧИ ГАЗОВ

Бражник И. Д., аспирант Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: ig.brazhnik@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9961-9759

В статье рассмотрена проблема повышения качества процесса заполнения инертными газами грузовых помещений танкеров во время смены типа груза. Целью исследований является повышение качества работы системы инертных газов на танкерах за счет использования новой технологии принудительной подачи инертных газов в грузовое пространство трюма. На основании анализа недостатков работы современных технологических схем установлено, что рабочий процесс не может гарантировать высокое качество процесса вентиляции грузовых помещений танкера. Результаты моделирования показали, что наибольшее сокращение времени процесса можно получить за счет принудительной подачи инертных газов. Проведен анализ влияния на такой процесс характеристик рабочих струй и проведено исследование работы трех технологических схем расположения сопловых насадок на поверхности грузового помещения. Установлено, что существенное сокращение времени рабочего процесса возможно получить за счет комбинированного использования четырех периферийных и одного центрального сопла для ввода инертных газов.

***Ключевые слова:** танкер, система инертных газов, концентрация кислорода, сопловая насадка, угол факела, скорость процесса.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.004-011

Постановка проблемы. Эффективность эксплуатации танкеров, помимо транспортных операций, определяется технологиями, которые используются во время подготовки судна к приему нового груза. В используемой в настоящее время технологии управления и контроля процессом инертизации грузовых танков на танкерах существует ряд недостатков. Одними из главных недостатков являются: большая продолжительность процесса; отсутствие технических способов интенсификации процесса вытеснения воздуха; несоответствие замеров концентрации воздуха на выходе реальным значениям внутри трюма [1]. Совокупность этих недостатков не может гарантировать высокое качество процесса вентиляции грузовых помещений танкера. По этой причине в большинстве случаев установленные международными нормами требования к концентрации кислорода в трюме не соблюдаются и на судах существует высокая вероятность взрывов или пожаров. Сокращение времени процесса вентиляции является востребованным с экономической точки зрения, поскольку для танкеров с дедвейтом более 50000 тонн сокращение времени со стандартных 30 часов до 15 часов может дать годовую экономию топлива в объеме от 90 до 100 тысяч долларов США.

Модернизация системы инертных танкеров предполагает проведение исследовательских работ по двум направлениям – конструктивному изменению технологии обработки тяжелого топлива в системе генерирования ИГ и применению технологии принудительной вентиляции трюмов судна.

Анализ последних исследований и публикаций. Основные принципы работы системы инертных газов на танкерах базируются на сжигании дизельного топлива в генераторе инертных газов. Он является отдельным устройством, которое никак не связано с судовым контуром подготовки топлива. Получаемые при функционировании генератора инертны газы продукты сгорания после проведения ряда операций по их очистке и снижению температуры направляются в грузовые трюма танкера.

В соответствии с Требованиями MORPOL [2] технические параметры, которые должны обеспечивать систему подачи инертных газов в грузовые трюмы танкера определяются следующими значениями: концентрация кислорода в трюме – менее 8 %; температура газов – менее 65 °С при подаче в грузовые трюмы и менее 50 °С при подаче в сухогрузные трюмы; давление газов на входе в трюм не менее 0,11 МПа.

Восходящее вынужденное движение воздуха с его последующим вытеснением из трюма танкера всегда вызывается действием выталкивающей силы от подаваемых в нижнюю часть трюма инертных газов. Эта сила появляется из-за изменения плотности многофазной смеси внутри трюма, а также является следствием взаимосвязанных между собой процессов теплопереноса и передачи массы из-за различных концентраций инертных газов и воздуха. Температурная стратификация движущегося многофазного потока в смеси с воздухом по высоте трюма также является одним из факторов, влияющих на скорость вытеснения воздуха из трюма судна [3]. При изменении температуры от 20 до 80 °С плотность воздуха изменяется на 20 % от 1,2 до 0,99 кг/м³ [4]. Именно она реализует механизм передачи энергии от инертных газов к воздуху.

При определении плотности инертных газов принято учитывать их четыре основных компонента – CO₂, H₂O, NO₂, O₂ [20]. Согласно данным работ [4-6] влияние температуры на плотность инертных газов можно учитывать как произведение, их плотности при нормальных условиях на температурную поправку по выражению:

$$\rho_{\text{д.г.}} = \frac{G_{\text{д.г.}}}{V_{\text{д.г.}}} \times \frac{273}{273+T} = \frac{1+\alpha L_0}{22.4(m_{\text{CO}_2}+m_{\text{H}_2\text{O}}+m_{\text{NO}_2}+m_{\text{O}_2})} \times \frac{273}{273+T} = \frac{1+\alpha\left(\frac{Q_m}{0.21}\right)}{22.4(m_{\text{CO}_2}+m_{\text{H}_2\text{O}}+m_{\text{NO}_2}+m_{\text{O}_2})} \times \frac{273}{273+T} \quad (1)$$

где $\rho_{\text{д.г.}}$ – плотность дымовых газов, кг/м³; $G_{\text{д.г.}}$ – общее количество дымовых газов, образующихся при сжигании 1 кг топлива, кг/кг; $V_{\text{д.г.}}$ – объем дымовых газов, м³; T – температура, °С; α – коэффициент избытка воздуха; L_0 – теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг/кг; Q_m – теоретическое количество кислорода, необходимое для сгорания 1 кг топлива, кг/кг; m_i – мольное содержание i -той компоненты инертных газов (рассчитывается по эмпирическим формулам [4]), м³.

В работах [7, 8] показано, что в случае вынужденной конвекции поле течения в замкнутом объеме перестает зависеть от механизмов теплопередачи и текущего поля температур. Этот факт напрямую указывает на целесообразность использования принудительной подачи инертных газов в грузовые трюмы танкеров. Основная направленность исследований механизма использования подачи струй инертных газов в грузовой трюм судна должна быть предназначена для решения задачи о сокращении времени вентиляции грузового трюма танкера.

Формулировка цели, задачи, объекта, предмета и методов исследования. Целью исследований является повышение качества работы системы инертных газов на танкерах за счет использования новой технологии принудительной подачи инертных газов в грузовое пространство трюма.

Основной задачей исследований является установление степени влияния параметров газового потока на входе в трюм на характер изменения концентрации воздуха внутри всего рабочего объема. Конечным результатом решения такой научно-исследовательской задачи должно быть сокращение времени вентиляции.

Объектом исследования является процесс инертнизации грузового трюма танкера, а предметом исследования является судовая система генерирования инертных газов.

Методами исследований являются: теория статистики при обработке результатов экспериментальных измерений величины концентрации кислорода внутри рабочего пространства грузового трюма, конечно-разностный метод для численного моделирования процессов естественной и принудительной вентиляции трюма, численные методы аппроксимации при построении графических зависимостей концентрации кислорода от рабочих показателей процесса подачи инертных газов в грузовые помещения трюмов танкера.

Основные результаты. При вентиляции трюма принудительная подача инертных газов должна быть согласованной со структурой движущегося с невысокими скоростями потока воздуха внутри ограничивающих его жестких стенок грузового трюма. Основное

изменение динамические характеристики многофазного потока газов и воздуха будут претерпевать в угловых зонах [9]. По этой причине очень важной является подача струй инертных газов именно в ядро восходящего воздушного потока. В этом случае крупномасштабные турбулентные вихри в середине грузового трюма будут приводить к сокращению времени процесса его вентиляции.

Очень важным вопросом является количество источников струй на дне грузового трюма и угол раскрытия α их факела. Меньшие углы раскрытия будут приводить к удлинению струи инертных газов, а значит увеличивать зону турбулизации ядра потока воздуха по высоте трюма. Большие углы будут влиять на интенсификацию процесса тепло- и массопереноса в угловых зонах нижней части грузового танка [10].

На стадии экспериментального изучения процесса принудительной вентиляции грузового танка при помощи инертных газов были использованы три технологические схемы. Они показаны на рис. 1.

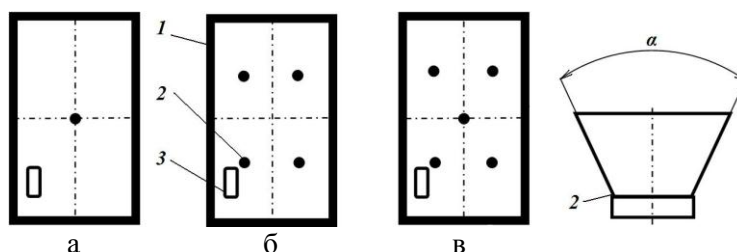


Рисунок 1 – Схемы подачи струй ИГ в грузовой трюм:

а – первая схема; б – вторая схема; в – третья схема; 1 – грузовой трюм; 2 – сопло подачи газов; 3 – выходное люковое отверстие

Первая схема содержала только один источник струи. Он находился в центральной точке грузового трюма. В ходе экспериментов использовались три сопла с углами раскрытия конуса факела вытекающей струи α соответственно равными 160° , 90° и 30° .

Вторая схема содержала четыре источника струй ИГ, которые на дне трюма располагались крестообразно. Сопла устанавливались по диагонали в центрах четырех одинаковых прямоугольных зон дна трюма. Их угол раскрытия для создания конусного факела струи составлял 30° . Этот угол использовался для исключения взаимного влияния струй инертных газов при их истечении в воздушное пространство.

Третья схема была комбинированная. Она показала самые лучшие результаты. Количество источников струй равнялось пяти. В начале процесса подачи инертных газов использовались четыре источника, расположенных по краям (см. рис. 1–в). В них, по аналогии со второй схемой, использовались сопла, создающие угол раскрытия конуса факела струи 30° . При снижении исходного значения концентрации кислорода в воздухе на тридцать процентов подача инертных газов происходила только из центрального источника струи. В нем также использовалось сопло, создающее угол раскрытия конуса факела струи равный величине 30° . С началом работы центрального сопла все краевые источники подачи струй инертных газов отключались.

Для всех трех схем подачи инертных газов в грузовой трюм была получена зависимость изменения во времени концентрации кислорода в ходе процесса вентиляции. Измерения проводились одновременно на различных высотах в шести грузовых трюмах. Результаты сравнения со стандартной технологией показаны на рис. 2. Поскольку при проведении экспериментов главным вопросом являлся выбор наиболее результативной схемы подачи инертных газов, то длительность работы газоанализатора была ограничена периодом в 5 часов. Приведенная на графиках величина концентрации кислорода определялась как средняя величина для всех четырех измерительных створов (центрального, на выходе и двух промежуточных).

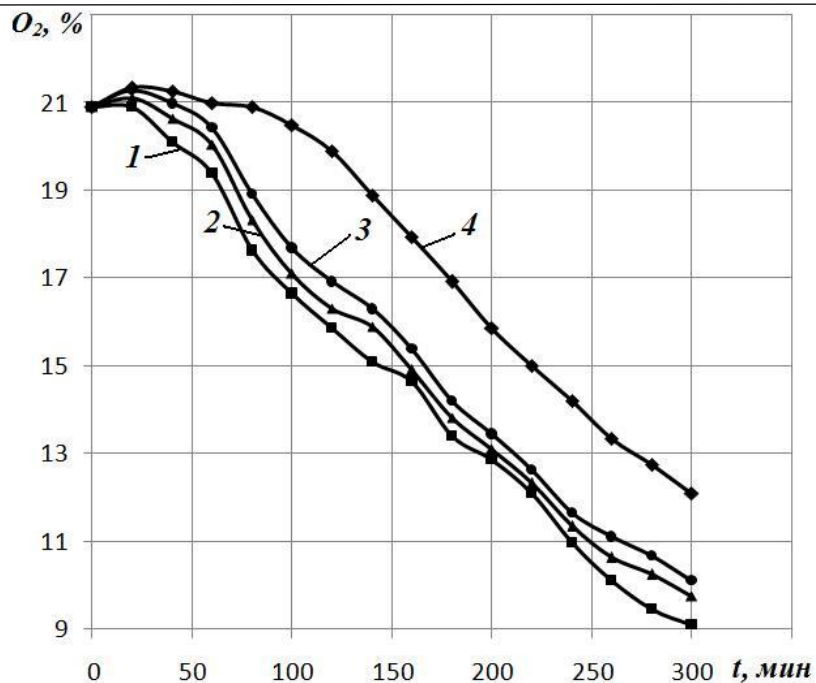


Рисунок 2 – Швидкість зміни концентрації кисню в трюмі при використанні трьох технологій подачі інертних газів:

1 – перша технологічна схема; 2 – друга технологічна схема; 3 – третя технологічна схема; 4 – стандартна подача інертних газів

Як видно на графіках, якісний характер процесу зменшення концентрації кисню всередині трюму в усіх чотирьох випадках залишався практично ідентичним. Це вказує на те, що вплив кута розкриття факела струї інертних газів на характер витіснення повітря з трюму не є основним і що на процес впливає ступінь щільної стратифікації багатозначного потоку газів і повітря всередині робочого простору вантажного трюму.

На рис. 2 також видно, що якість роботи другої технологічної схеми подачі інертних газів порівняно з першою схемою краще, але найбільше скорочення часу вентиляції вантажного трюму було досягнуто з використанням третьої технологічної схеми. Порівняно з використанням традиційної подачі інертних газів зміни в кращу сторону при інших рівних умовах привели до додаткового зменшення концентрації кисню за той же самий період вентиляції трюму.

Порівняння результатів вимірювань, описуваних весь процес зміни концентрації кисню в вантажному трюмі танкера з використанням примусової і стандартної технології подачі інертних газів, показано на рис. 3. На цьому ж рисунку наведено дані теоретичних розрахунків (сплошна лінія) процесу вентиляції трюму. Приведені на графіку значення концентрації кисню відповідають точці виходу повітря з вантажного трюму в атмосферу. Експериментальні дані, показані на рис. 3, були отримані одночасно, коли два повністю ідентичних вантажних трюму заповнювали інертними газами. Подача газів відбувалася за стандартної технологічної схеми і з використанням розробленої комбінованої схеми (третья технологічна схема на рис. 1).

Аналіз наведених результатів показує, що використання примусової подачі призводило до кількісного, але не якісного розходження в змінах за часом концентрації кисню всередині трюму. Отримане розходження між двома експериментальними кривими вказує на досягнення головної мети досліджень.

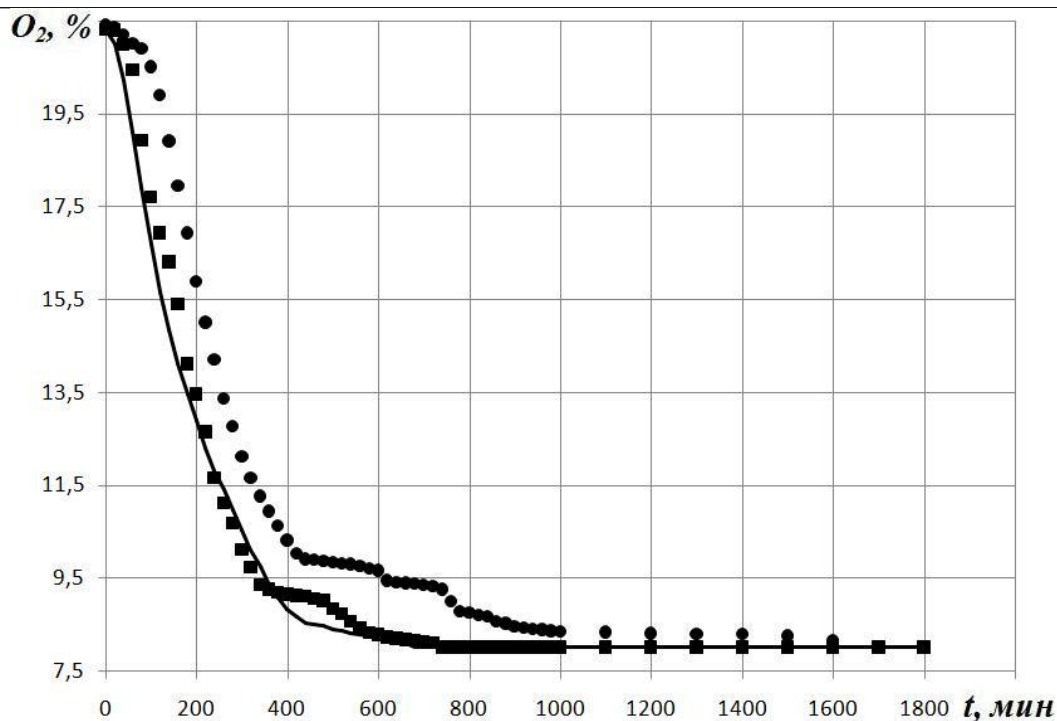


Рисунок 3 – Изменение во времени концентрации кислорода при вентиляции инертными газами грузовых трюмов танкера:

● – стандартная подача; ■ – принудительная подача; сплошная линия – расчет

Использование процесса принудительной подачи инертных газов внутрь трюма приводит к получению самого главного и основного результата – сокращению времени, затрачиваемого на вентиляционную обработку трюмов танкера перед получением нового груза. На графике видно, что в начале процесса вентиляции изменение концентрации кислорода происходит одинаково вне зависимости от способа подачи ИГ. Существенное расхождение между кривыми начинается через 80 минут после начала процесса вентиляции трюма. В зависимости от способа вентиляции трюма получаемая конечная концентрация кислорода внутри его рабочего пространства отличается и ее значение в случае принудительной вентиляции становится меньше, чем при естественной. На рис. 3 видно, что выход на стационарное значение концентрации кислорода равно 8 %, при принудительной подаче инертных газов наблюдается приблизительно через 740 минут после начала процесса вентиляции трюма. Аналогичная величина концентрации в ходе естественной вентиляции трюма за этот период времени была больше и составляла 9,25 %. Ее выход на стационарное значение наблюдался приблизительно через 1700 минут после начала процесса вентиляции трюма.

В процентном соотношении улучшение процесса вентиляции трюма при переходе от естественной к принудительной вентиляции трюма составило 13,5 %. Сокращение затраченного времени при прочих равных условиях составило 56,47 %.

В ходе вытеснения воздуха при помощи инертных газов температура внутри грузового трюма танкера постоянно растет. Процесс ее изменения во времени по высоте танка был изучен и полученные результаты ее измерения показаны на рисунке 4. Приведенные четыре кривые соответствуют четырем измерительным створам располагавшимся на соответствующих высотах грузового танка: 0, 25 %, 50 %, 100 %.

По аналогии с процессом изменения концентрации кислорода внутри рабочего объема трюма также наблюдается стабилизация температуры воздуха и инертных газов. Как видно на рис. 4, начиная с момента времени равного 960 минутам, температура на всех измерительных уровнях перестает изменяться и принимает свое стационарное значение.

При сравнении результатов измерений температуры на выходе из трюма при стандартной и принудительной вентиляции было установлено, что стабилизация в

последнем случае также наступает ранее. Температурный градиент, составляющий $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, достигался за время меньшее на 38,18 % по сравнению со стандартной операцией вентиляции грузового трюма танкера.

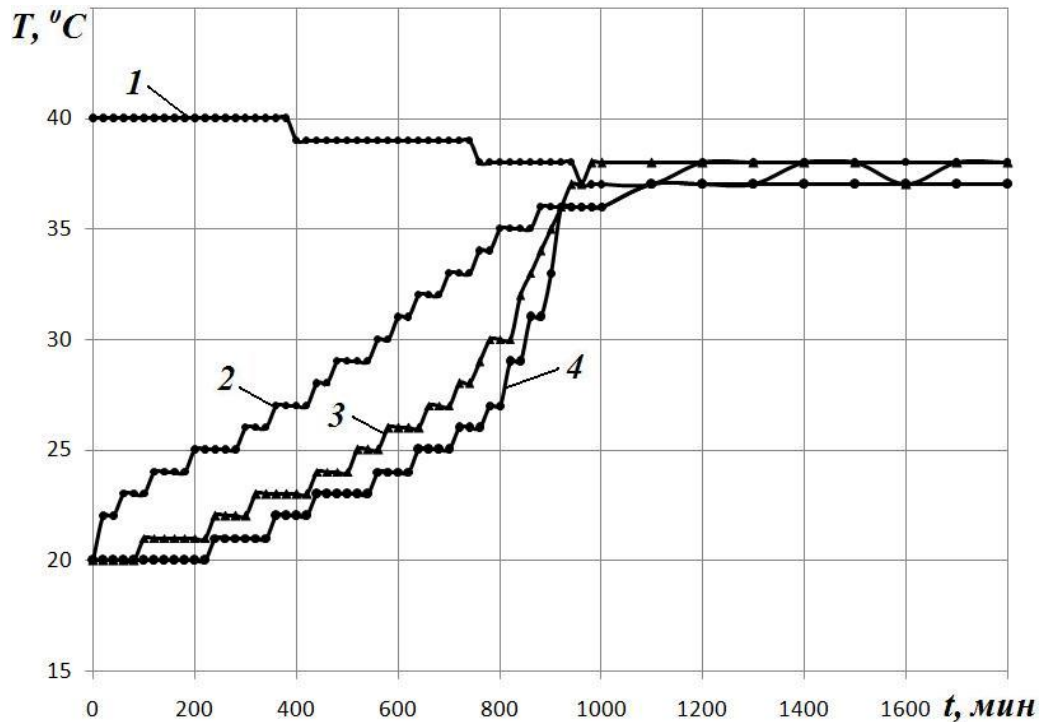


Рисунок 4 – Характер изменения температуры по высоте грузового трюма танкера. Расположение створа по отношению к высоте трюма H : 1 – 0; 2 – $0,25H$; 3 – $0,5H$; 4 – H

Выводы

1. Используемая в настоящее время технология вытеснения воздуха за счет инертных газов из грузовых трюмов на танкерах характеризуется большой продолжительностью процесса. Для решения этой проблемы предложено повысить качество работы системы инертных газов на танкерах за счет использования новой технологии принудительной подачи инертных газов в грузовое пространство трюма.

2. При вентиляции трюма принудительная подача инертных газов должна быть согласованной со структурой движущегося с невысокими скоростями потока воздуха внутри ограничивающих его жестких стенок грузового трюма. Для этого была разработана комбинированная схема подачи инертных газов в трюм судна.

3. За счет реализации на танкере разработанной технологии принудительной подачи инертных газов в грузовой трюм в процентном соотношении улучшение процесса при переходе от естественной к принудительной вентиляции трюма составило 13,5 %. Сокращение затраченного времени при прочих равных условиях составило 56,47 %.

4. При принудительной подаче инертных газов в грузовой трюм судна стабилизация температуры внутри трюма наступает раньше, чем в случае использования стандартной технологии. Температурный градиент, составляющий $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$, достигался за время меньшее на 38,18 % по сравнению со стандартной операцией вентиляции грузового трюма танкера.

5. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку способов технической реализации разработанной технологии в зависимости от конструкции танкера и технических характеристик судовой системы инертных газов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малахов А. В., Колегаев М. А., Бражник И.Д. Метод принудительной вентиляции трюмов на танкерах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2018. № 29 (68;3). С. 166–169.
2. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78.
3. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло– и массообмен. Москва: Мир, 1983.
4. Зубарев В. Н., Козлов А. Д., Кузнецов В. М. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях : справочник. Москва : Энергоатомиздат, 1989.
5. Уонг Х. Основные формулы по теплообмену для инженеров. Москва: Атомиздат, 1979.
6. Гусенов Д. А., Спектор С. С., Вайнер Л. З. Технологические расчеты процессов переработки нефти. Москва : Химия, 1964.
7. Elder J. W. (2006). Turbulent free convection in a vertical slot. *Journal of fluid mechanics*. 23(1), 99–111.
8. Eckert E.R.G. & Carlson W. O. (1961). Natural convection in an air enclosed between two vertical plates with different temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2 (2), 106–120.
9. Абрамович Г. Н., Крашенников С. У., Секундов А. Н., Смирнова И. П. Турбулентное смешение газовых струй. Москва : Наука, 1974.
10. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. Москва : Наука, 1960.

REFERENCES

1. Malakhov, A. V., Kolegaev, M. A. & Brazhnik, I. D. (2018). Metod prinuditelnoj ventiljacii tryumov na tankerax. *Vcheni zapiski Tavrijskogo nacionalnogo universitetu imeni V.I.Vernadskogo. Seriya «Texnichni nauki»*, 29 (68;3), 166–169.
2. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL 73/78.
3. Dzhalurija, J. (1983). *Estestvennaya konvekciya. Teplo– i massoobmen*. Moskva : Mir.
4. Zubarev, V. N., Kozlov, A. D. & Kuznecov, V.M. et al. (1989). *Teplofizicheskie svojstva texniceski vazhnyx gazov pri vysokix temperaturax i davleniyax : spravocnik*. Moskva : Energoatomizdat.
5. Uong, X. (1979). *Osnovnye formuly po teploobmenu dlya inzhenerov*. Moskva : Atomizdat.
6. Gusejnov, D. A., Spektor, S. S. & Vajner, L. Z. (1964). *Texnologicheskie raschety processov pererabotki nefi*. Moskva : Ximiya.
7. Elder J. W. (2006). Turbulent free convection in a vertical slot. *Journal of fluid mechanics*. 23 (1), 99–111.
8. Eckert E. R. G. & Carlson W. O. (1961). Natural convection in an air enclosed between two vertical plates with different temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2 (2), 106–120.
9. Abramovich, G. N., Krashennikov, S. Y., Sekundov, A. N. & Smirnova, I. P. (1974). *Turbulentnoe smeshenie gazovyx struj*. Moskva : Nauka.
10. Abramovich G.N. (1960). *Teoriya turbulentnyx struj*. Moskva : Nauka.

Бражник І. Д. ЗМІНА РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ІНЕРТИЗАЦІЇ ТАНКЕРА ЗАВДЯКИ ПРИМУСОВОМУ ПОДАННЮ ГАЗІВ

У статті розглянута проблема підвищення якості процесу заповнення інертними газами вантажних приміщень танкерів під час зміни типу вантажу. На підставі аналізу недоліків роботи сучасних технологічних схем встановлено, що робочий процес не може гарантувати високу якість процесу вентиляції вантажних приміщень танкера. Метою досліджень є підвищення якості роботи системи інертних газів на танкерах за рахунок використання нової технології примусового подання інертних

газів до вантажного простору трюму. Результати моделювання показали, що найбільше скорочення часу процесу можливо отримати завдяки примусовому поданню інертних газів. Проведено аналіз впливу на такий процес характеристик робочих струменів і проведено дослідження роботи трьох технологічних схем розташування соплових насадок на поверхні вантажного приміщення. Встановлено, що істотне скорочення часу робочого процесу можливо отримати завдяки комбінованому використанню чотирьох периферійних і одного центрального сопел для введення інертних газів.

Ключові слова: танкер, система інертних газів, концентрація кисню, соплова насадка, кут факела, швидкість процесу.

Brazhnik I. D. CHANGE OF OPERATING CHARACTERISTICS OF TANKER INERTIZATION SYSTEM BY USE OF FORCED GAS SUPPLY

The aim of the research is to improve the quality of the inert gas system on tankers through the use of new technology for the forced inert gas supply to the cargo hold space.

The article deals with the problem of increasing the quality of the process of filling the cargo spaces of tankers with inert gases when changing the cargo type. Based on the analysis of the shortcomings of the operation of modern technological schemes, it has been stated that the working process cannot guarantee the high quality of ventilation process of the cargo spaces of the tanker. The simulation results have shown that the greatest reduction of the process time can be obtained due to the forced supply of inert gases. An analysis on checking the influence of the working jets on the characteristics of such a process has been done and an investigation of the operation of three technological schemes for the location of cone nozzles on the surface of the cargo space has been provided. The currently used technology for displacing air from inert gases from cargo holds on tankers is characterized by a long process time. To solve this problem, it was proposed to improve the quality of the inert gas system on tankers through the use of new technology for the forced inert gas supply to the cargo hold space. During the ventilation of the hold, the forced supply of inert gases must be consistent with the structure of the air stream moving at low speeds inside the rigid walls of the cargo hold bounding it. For this, a combined scheme for supplying inert gases to the hold of the vessel was developed. Due to the implementation on the tanker of the developed technology for the forced supply of inert gases to the cargo hold as a percentage, the process improvement in the transition from natural to forced hold ventilation was 13.5%. Reducing the time spent, ceteris paribus, amounted to 56.47%. Further research should be aimed at developing methods for the technical implementation of the developed technology, depending on the design of the tanker and the technical characteristics of the ship's inert gas system.

Keywords: tanker, inert gas system, oxygen concentration, cone nozzle, plume angle, speed of the process.

© Бражнік І. Д.

Статтю прийнято
до редакції 4.03.19