

УДК 629.123

А.В.МАЛАХОВ, М.А.КОЛЕГАЕВ, И.Д.БРАЖНИК
Национальный университет "Одесская морская академия"**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
СИСТЕМЫ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ НА ТАНКЕРАХ**

В данной работе рассмотрена судовая система инертных газов и показаны основные пути ее модернизации за счет использования нового процесса принудительной вентиляции. Результаты моделирования на основе предложенной математической модели позволили установить основные закономерности процесса вентиляции трюмов танкера. В ходе натурных исследований подтверждена адекватность математической модели и подтверждена эффективность предложенного метода принудительной подачи инертных газов в грузовые трюма танкера.

Ключевые слова: генератор инертных газов, концентрация кислорода, скорость вентиляции, поле давления, угол раскрытия струи.

О.В.МАЛАХОВ, М.О.КОЛЕГАЄВ, І.Д.БРАЖНІК
Національний університет "Одеська морська академія"**ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
СИСТЕМИ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ НА ТАНКЕРАХ**

В даній роботі розглянуто судову систему інертних газів і показані основні шляхи її модернізації за рахунок використання нового процесу примусової вентиляції. Результати моделювання на основі запропонованої математичної моделі дозволили встановити основні закономірності процесу вентиляції трюмів танкеру. В ході натурних досліджень підтверджена адекватність математичної моделі і підтверджена ефективність запропонованого методу примусового нагнітання інертних газів в вантажні трюма танкера.

Ключові слова: генератор інертних газів, концентрація кисню, швидкість вентиляції, поле тиску, кут розкриття струменя.

O.V.MALAKHOV, M.A.KOLEGAEV, I.D.BRAJNIK
National University "Odessa Maritime Academy"**IMPROVEMENT OF OPERATIONAL INDICATORS
OF THE INERT GAS SYSTEM ON TANKERS**

In this paper, we consider the ship's inert gas system and show the main ways of its modernization through the use of a new process of forced ventilation. The results of modeling on the basis of the proposed mathematical model allowed to establish the basic regularities of the process of ventilation of the tanker's hold. In the course of full-scale studies, the adequacy of the mathematical model was confirmed and the effectiveness of the proposed method of supplying inert gases into cargo holds of the tanker was confirmed.

Keywords: generator of inert gases, oxygen concentration, ventilation rate, pressure field, jet opening angle.

Постановка проблеми

На всех без исключения танкерах дедевейтом от 100 до 1000 тонн, используется технологический контур производства и подачи инертных газов. Он всегда включается в работу при использовании линий подачи груза в трюм танкера и при работе систем очистки трюмов. Его использование на судне обычно является предварительной стадией при операции получения новых грузов. Использование на танкерах системы инертных газов является обязательным и с 1978 года регламентируется решением ИМО [1].

Эффективность эксплуатации танкеров, помимо транспортных операций, определяется также технологиями, которые используются во время подготовки судна к приему нового груза. В этом случае особое значение имеет качество эксплуатации системы инертных газов танкера. Ее главное предназначение заключается в реализации комплекса мер, обеспечивающих создание пожаро- и взрывобезопасной атмосферы внутри трюма. Сокращение времени работы системы инертных газов танкера напрямую определяет стоимостные показатели работы судна.

В соответствии с Требованиями MORPOL [1] технические параметры, которые должна обеспечивать система подачи инертных газов в грузовые трюма танкера определяются следующими значениями: концентрация кислорода в инертных газах – менее 5 %; температура ИГ - менее 65°C при

подаче в грузовые трюма и менее 50°C при подаче в сухогрузные трюма; давление инертных газов в точке входа в трюм не менее 0,11 МПа.

Анализ последних исследований и публикаций

На танкерах все технологические контуры производства, обработки и подачи инертных газов являются универсальными и содержат в большинстве случаев однотипное оборудование и магистрали. По этой причине все технические проблемы, которые возникают во время их эксплуатации, также являются идентичными. В эксплуатации таких систем существует три отдельных направления, которые включают в себя уже конкретные специфические судовые проблемы.

Первым направлением является техническое, когда все аварийные проблемы в работе системы инертных газов вызваны несовершенством конструкций используемых технических устройств.

Второе направление определяется проектировочными просчетами или наличием сильных недостатков в используемых технологиях подачи инертных газов внутрь рабочего объема грузового трюма.

Третье направление определяется качеством используемых средств измерения и контроля, а также личностным фактором со стороны экипажа танкера.

Анализ судовых аварийных отчетов и технологических недостатков в работе систем инертных газов на танкерах показал, что в большинстве случаев процесс создания пожаро- или взрывобезопасной микроатмосферы внутри трюма проводится с экономической точки зрения не эффективно. Самым главным недостатком является завышенная продолжительность процесса вентиляции, что при оплате стоянки судна в порту или эксплуатации в открытом море выражается большим убыточным денежным эквивалентом. В среднем, в зависимости от места расположения порта, один час стоянки судна на причале стоит 10000 долларов США. Уменьшение времени, затрачиваемого на вентиляцию трюмов инертными газами, в среднем на пять часов при средней частоте операций перезагрузки трюмов танкера два раза в месяц может привести к получению дополнительного экономического эффекта в 100000 долларов США в месяц. Также, экономия может быть получена от сокращения количества потребляемого топлива при производстве инертных газов. В среднем один час ее работы требует подачи 100 кг дизельного топлива. При стоимости топлива 800 долларов США за одну тонну сокращение процесса вентиляции на 5 часов дает экономию в 4000 долларов США за один технологический цикл.

Главной причиной большой продолжительности процесса вентиляции трюмов танкера инертными газами является несовершенство используемых технологий. Вытеснение воздуха из рабочего объема трюма происходит только за счет процессов естественной конвекции и диффузии [2] без использования каких-либо принудительных механизмов увеличения скорости процесса массообмена воздуха и инертных газов.

Общий вид диаграммы, показывающей взаимное влияние текущих значений концентрации кислорода и углеводородов, определяющих взрыв микроатмосферы в грузовом трюме танкера показан на рисунке 1. На приведенной диаграмме также отображены контуры их предельных границ.

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

В работе [5] 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 трюм судна.

В применении к вентиляции грузового трюма наиболее близкими являются результаты работы [6] где рассмотрена тепловая конвекция в трехмерном прямоугольном объеме с открытым верхом. Эксперимент проводился в диапазоне чисел Рэлея от 100 до 10⁸. Для случая передачи тепла от одной нагретой стенки к другой были получены безразмерные профили температуры и скорости. В ходе экспериментов [21] было установлено, что:

- при числах Рэлея $Ra < 10^3$ в прямоугольном объеме возникает одна ячейка со слабой стационарной циркуляцией. Жидкость, нагретая у стенки, поднималась вверх, а затем опускалась вниз около холодной стенки. По ширине всего объема течение было направлено только вертикально (исключая повороты вблизи верхней и нижней границ);

- при числах Рэлея $10^3 < Ra < 10^5$ градиент температуры вблизи стенок возрастал, а во внутренней области течения оставался постоянным;

- распределение скорости в диапазоне чисел Рэлея от $3 \cdot 10^4$ до $3,6 \cdot 10^6$ характеризуется симметричностью относительно вертикальной оси симметрии рассматриваемого объема. Рост числа

Рэлея свидетельствует о пространственном увеличении по ширине зоны ядра потока с небольшими значениями скорости локализации концевой области течения с высокими значениями скорости потока вблизи жестких вертикальных стенок.



Рис. 1. Общая диаграмма подачи инертных газов для грузовых трюмов танкера

В работах [3, 5-6] в качестве нижней границы возникновения вторичных течений в замкнутом прямоугольном объеме приводятся различные числа Рэлея. Общий диапазон разброса полученных значений составляет от $Ra=2.1 \cdot 10^5$ до $Ra=3.9 \cdot 10^5$. Более сложные структуры потока возникают согласно данным работы [6] при числах Рэлея $Ra > 10^6$. В этом случае наблюдается возникновение многоячеистых структур со слабыми сдвиговыми течениями на их границах.

Формулировка цели исследования

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. С учетом этого цель исследований заключается в разработке нового технического метода подачи инертных газов в трюм судна с целью выхода на требуемые технологические параметры микроатмосферы внутри грузового трюма за более короткие периоды времени. Разработанный метод должен быть реализован без изменения расходно-напорных характеристик судовой системы производства и подачи инертных газов. Решаемая научно-техническая задача должна обеспечивать существенное повышение качества эксплуатации судна за счет изменения технологии вентиляции трюмов и снижения аварий, связанных с качеством и длительностью работы таких систем.

Изложение основного материала исследований

С точки зрения повышения качества процесса вентиляции трюмов танкера при приеме нового груза основными рабочими показателями процесса тепломассопереноса инертных газов и воздуха внутри трюма могут рассматриваться: текущая плотность их смеси; поле скорости внутри объема трюма; поле давления внутри объема трюма; распределение температуры смеси по высоте трюма; текущая концентрация кислорода внутри трюма; продолжительность процесса вытеснения воздуха из грузовых трюмов.

В силу сложности теоретического описания процесса конвективно-диффузионного переноса инертных газов в судовых грузовых трюмах необходимо использовать ряд допущений. В этом случае необходимо принимать, что: движение воздуха и инертных газов внутри трюма можно рассматривать, как движение потока внутри плоского канала; во время процесса термогравитационной конвекции все коэффициенты переноса являются постоянными и не зависят от температуры [7].

В общем случае при рассмотрении термогравитационной конвекции уравнение, описывающее изменение плотности смеси инертных газов и воздуха внутри трюма танкера может быть записано в виде [7]

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T dP \quad (1)$$

где ρ – плотность инертных газов, кг/м^3 ;

t – время, с;

V – скорость, м/с;

P – давление, Па;
 η – динамическая вязкость, Па·с;
 g – ускорение свободного падения м/с².

Уравнение (1) должно быть дополнено уравнением, описывающим изменение температуры T инертных газов при термогравитационной конвекции в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)T = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T \quad (2)$$

где k – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК);
 C_p – теплоемкость инертных газов при постоянном давлении, Дж/К.

В соответствии с рекомендациями работы [3] распределение температуры между стенками по ширине и высоте грузового трюма можно принимать линейным. Граничными значениями в этом случае должны выступать температура подаваемых в трюм инертных газов и находящегося в нем воздуха.

С теоретической точки зрения в рамках модели сплошной среды с масштабами $l \gg \lambda$, где λ длина свободного пробега молекул, движение инертных газов в судовом трюме должно рассматриваться, как сплошное. В этом случае во всей области трюма движущийся поток воздуха и инертных газов нигде не претерпевает разрыв и при моделировании может быть описан уравнением неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (3)$$

и уравнениями, описывающими свободную конвекцию, когда движение возникает за счет действия силы Архимеда (разности плотностей воздуха и инертных газов) в поле действия массовых сил.

Продолжительность процесса вытеснения воздуха из грузовых трюмов судна напрямую определяется такими параметрами, как скорость подачи струй инертных газов и число Прандтля Pr . Чем выше их значения, тем сильнее будет конвективный перенос, возрастание архимедовой силы и величина эжекции воздуха вдоль оси действия струи инертных газов.

При разработке математической модели в из-за невысоких скоростей движения потока воздуха внутри трюма была использована гипотеза что процесс движения является равновесным. В этом случае согласно данным работы [7] динамическая задача о движении воздуха при его вытеснении из трюма может рассматриваться отдельно от тепловой, когда внутри трюма происходит теплообмен между воздухом и инертными газами.

Изэнтропическое движение воздуха в трюме описывалось системой уравнений (4), а движение струй инертных газов в области выхода из сопловых насадок внутри трюма описывалось системой дифференциальных уравнений Эйлера (5)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (P + \rho V_x^2) &= 0 \\ \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (P + \rho V_y^2) &= 0 \\ \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (P + \rho V_z^2) &= 0 \\ \frac{P}{\rho^\gamma} &= const \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial V_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Начальные условия для моделирования движения воздуха внутри трюма записывались в виде состояния его полного покоя перед началом подачи струй инертных газов. Гидростатическое давление задавалось по закону:

$$P = -g\rho_0 \left(y - \frac{C_w}{2H} T_0 y^2 \right) \quad (6)$$

где C_w – объемный коэффициент теплового расширения, $^{\circ}C^{-1}$;
 ρ_0, T_0 – начальные значения плотности и температуры.

Для получения результатов с высокой точностью необходимо учитывать угол качки судна γ . В этом случае в уравнении (6) необходимо заменить слагаемое g на: $g\cos(\gamma)$ в направлении оси OX ; $g\sin(\gamma)$ в направлении оси OY .

В ходе расчетов было установлено, что при использовании принудительной вентиляции грузовых трюмов танкера за счет подачи струй инертных газов возможно получить сильное восходящее течение воздуха. Такой результат является автомоделным и при изменении объемного расхода подаваемых ИГ или размеров судовогогрузового трюма с учетом сохранения его геометрического подобия будет оставаться неизменным. В этом случае получаемые конфигурации поля скорости и давления также не изменятся.

При моделировании движения в замкнутом объеме трюма были получены результаты, описывающие структуру получаемого потока. Квазистационарные расчетные поля скорости, линий тока и завихренности при различных значениях чисел Рейнольдса движущегося потока указывают на возникновение характерных вихревых областей. В пространстве трюма они сконцентрированы вблизи угловых зон и характеризуются своей симметричностью по отношению к вертикальной оси симметрии танка. Они остаются устойчивыми с ростом числа Рейнольдса моделируемого потока. На основе анализа результатов моделирования установлено, что подача струй инертных газов для вентиляции танка должна производиться в центральной части грузового трюма танкера. В этом случае перемешивание инертных газов с воздухом будет характеризоваться повышенной турбулизацией и приводить к возникновению в областях угловых зон трюма характерных зон перемешивания. За счет присутствия этих областей перемешивания концентрация кислорода будет уменьшаться до минимального значения за более короткие периоды времени по сравнению со случаем естественной подачи инертных газов сверху трюма.

Очень важным вопросом с точки зрения изготовления и монтажа системы принудительной вентиляции грузовых трюмов танкера является количество источников струй инертных газов на дне трюма и угол раскрытия α их факела. Меньшие углы раскрытия будут приводить к удлинению струй 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. По этой причине на стадии экспериментального изучения процесса принудительной вентиляции грузового танка при помощи инертных газов были использованы показанные на рисунке 2 три технологические схемы.

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

Вторая схема содержала четыре источника струй инертных газов, которые на дне трюма располагались в виде креста. Сопла устанавливались по диагонали в центрах четырех одинаковых прямоугольных зон дна трюма. В них использовались сопла, создающие угол раскрытия конуса факела струи 30° . Этот угол использовался для исключения взаимного влияния струй инертных газов при их истечении в воздушное пространство.

Третья схема была комбинированная и показала самые высокие результаты. Количество источников струй было равно пяти. В начале процесса подачи инертных газов использовались четыре источника. Они были расположены по краям. 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 с углом раскрытия конуса факела струи равным 30° . С началом работы центрального сопла все крайние источники подачи струй инертных газов отключались.

В ходе натурных исследований были измерены значения величины концентрации кислорода при вентиляции грузового трюма. Измерения проводились одновременно на различных высотах в четырех грузовых трюмах. На рис. 3-5 показаны сводные результаты проведенных натурных исследований.

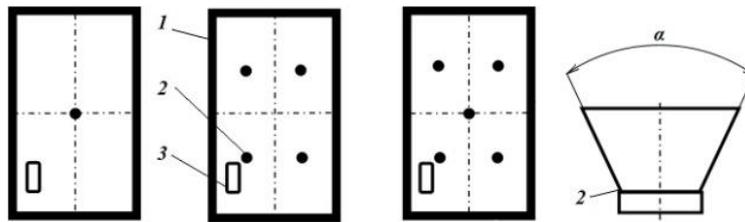


Рис. 2. Схемы подачи струй ИГ в грузовой трюм
 1 – грузовой трюм; 2 – сопло подачи инертных газов; 3 – выходное люковое отверстие

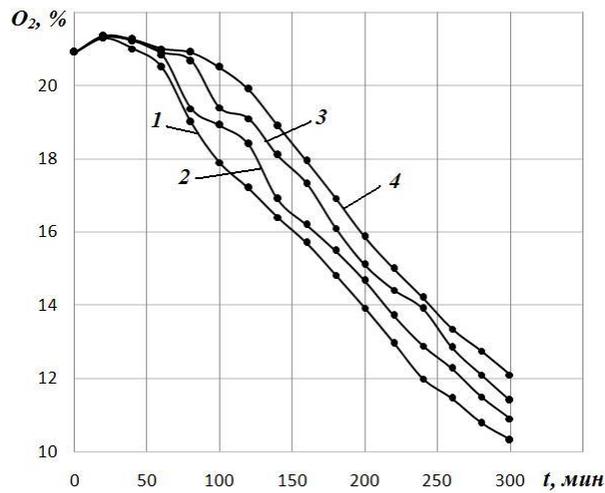


Рис. 3. Изменение концентрации кислорода в трюме при использовании первой технологической схемы
 1 – угол раскрытия конуса факела струи 300; 2 – угол раскрытия конуса факела струи 900; 3 – угол раскрытия конуса факела струи 1600; 4 – стандартная подача ИГ

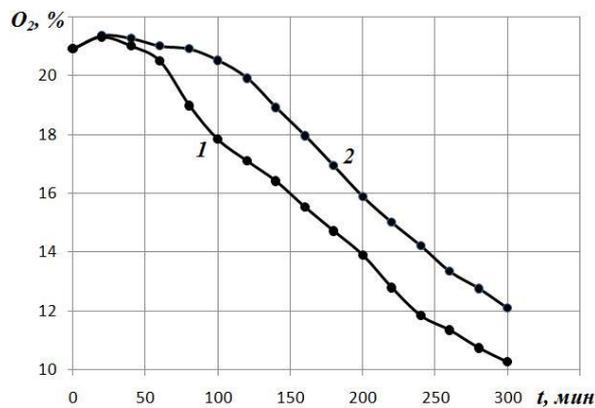


Рис. 4. Изменение концентрации кислорода в трюме при использовании второй технологической схемы
 1 – угол раскрытия конуса факела струи 300; 2 – стандартная подача ИГ

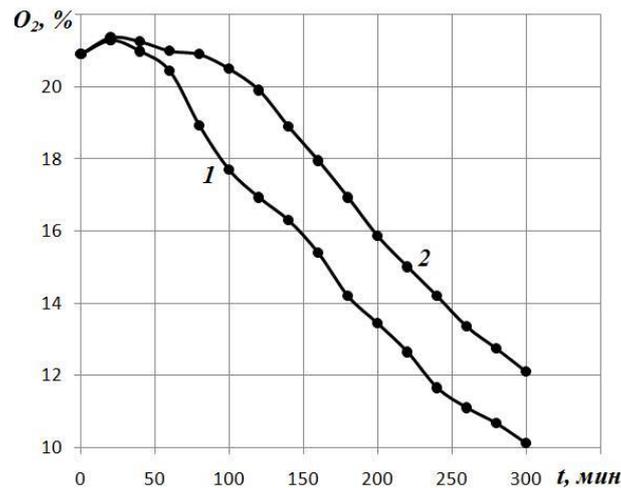


Рис. 5. Изменение концентрации кислорода в трюме при использовании третьей технологической схемы
 1 – угол раскрытия конуса факела струи 30° ; 2 – стандартная подача ИГ

При проведении экспериментальных исследований в условиях работы танкера были проведены измерения, описывающие процесс изменения концентрации кислорода в его грузовых трюмах во время вентиляции за счет принудительной подачи инертных газов. Эти данные были сопоставлены с результатами измерений аналогичного параметра при стандартной операции подачи инертных газов в трюм судна и с результатами теоретических исследований на основе разработанной математической модели. Все результаты показаны на сводном рисунке 6. Приведенные на графике значения концентрации кислорода соответствуют месту выхода воздуха из грузового трюма в атмосферу, а экспериментальные точки были

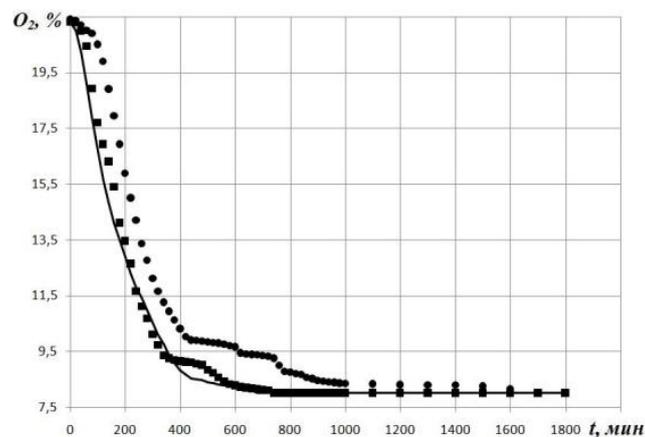


Рис. 6. Изменение концентрации кислорода при вентиляции грузовых трюмов танкера
 ● – стандартная подача ИГ; ■ – принудительная подача ИГ; сплошная линия – расчет

получены одновременно, когда два полностью идентичных грузовых трюма заполнялись инертными газами по стандартной технологической схеме и с использованием разработанной комбинированной схемы.

Как видно из графиков использование принудительной подачи приводит к количественному, но не качественному расхождению в изменениях во времени концентрации кислорода внутри трюма. Полученное расхождение между двумя экспериментальными кривыми показывает, что 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 инертных газов. Существенное расхождение между кривыми начинается через 80 минут после начала процесса вентиляции трюма. В зависимости от способа вентиляции трюма получаемая конечная концентрация кислорода внутри трюма отличается и ее значение в случае принудительной вентиляции становится

меньше, чем при естественной. На рис. 6 видно, что выход на стационарное значение концентрации кислорода равно 8 % при принудительной подаче ИГ наблюдался 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 %, а сокращение затраченного времени при прочих равных условиях составило 56,47 %.

Выводы

1. Продолжительность процесса вытеснения воздуха из грузовых трюмов танкера напрямую определяется скоростью подачи струй инертных газов и числом Прандтля. Чем выше их значения, тем сильнее будет конвективный перенос, возрастание архимедовой силы и величина эжекции воздуха вдоль оси действия струи инертных газов.

2. При использовании принудительной вентиляции грузовых трюмов танкера за счет подачи струй инертных газов возможно получить сильное восходящее течение воздуха.

3. Подача струй инертных газов для вентиляции танка должна производиться в центральной части грузового трюма танкера. В этом случае их перемешивание с воздухом характеризуется повышенной турбулизацией и приводит к возникновению в областях угловых зон трюма характерных зон перемешивания. За счет присутствия этих областей концентрация кислорода уменьшается до минимального значения за более короткие периоды времени по сравнению со случаем стандартной подачи инертных газов сверху трюма.

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

Список использованной литературы

1. Международная конвенция MARPOL 73/78.
2. Гидрогазодинамика и процессы тепломассопереноса: Сб. науч.тр. / Ред.кол. Н.Д. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1986. – 152 с.
3. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
4. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
5. Eckert E.R.G., Carlson W.O. Natural convection in an air enclosed between two vertical plates with different temperatures. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2 (1961), 2, pp. 106-120.
6. Elder J.W. Turbulent free convection in a vertical slot. Journal of fluid mechanics. March 2006. Volume 23. Issue 1. pp. 99-111.
7. Годштик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И. Вязкие течения с парадоксальными свойствами. – Новосибирск.: Наука, Сиб. Отд-ние, 1989. – 336 с.
8. Пейре Р., Тейлор Т. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. / Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 352 с.