

Бражник И.Д.

Национальный университет «Одесская морская академия»

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЕНТИЛЯЦИИ ГРУЗОВЫХ ТРЮМОВ ТАНКЕРА С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

У статті розглянута суднова технологічна операція, яка пов'язана з вентиляванням вантажних трюмів танкера за допомогою інертних газів і відповідно до міжнародного законодавства є обов'язковою. Таку процедуру необхідно виконувати кожен раз при отриманні судном нового типу вантажу.

Вентиляція трюмів в силу специфічних особливостей самого процесу і присутності на судах різних технічних проблем проводиться неякісно. Вона характеризується підвищеною тривалістю і дуже малою ефективністю. У більшості випадків такі недоліки відображаються у дуже значній тривалості процесу видалення повітря з вантажного трюму танкера, а також присутністю залишкової концентрації повітря вище встановлених міжнародним законодавством меж.

У статті показано, що під час науково-дослідних робіт було запропоновано використання процесу примусової вентиляції трюму за рахунок нової технології подачі інертних газів у трюм судна. Аналіз такого процесу вентиляції вантажного трюму танкера було проведено на підставі результатів теоретичних і експериментальних досліджень в реальних умовах роботи судна.

Встановлено, що створення безпечної мікроатмосфери з пожежної та вибухової точки зору всередині вантажного трюму танкера при проведенні вантажних операцій може досягатися за більш короткий період часу. Використання примусових механізмів збільшення швидкості процесу масообміну повітря і інертних газів базується на використанні технології подання інертних газів у вигляді струменів.

Показано, що при вентиляції трюму примусова подача інертних газів повинна ґрунтуватися на розподілі поля температур і структурі потоку, що рухається з невисокими швидкостями всередині жорстких стінок трюму, що обмежують його. Подача струменів інертних газів в ядро потоку, що витікає, призводить до турбулізації сталої течії в середній частині вантажного трюму танкера і скорочує час процесу його вентиляції.

Ключові слова: танкер, система інертних газів, примусова вентиляція, концентрація кисню, вантажний трюм.

Постановка проблеми. Эксплуатация танкера всегда подразумевает использование процесса вентиляции его грузовых трюмов. Реализация этого процесса на судне обеспечивает главные требования к созданию и поддержанию безопасной с точки зрения возникновения пожаров и взрывов микроатмосферы в грузовых трюмах. На всех танкерах этот процесс является предварительным перед операцией получения нового груза. Использование системы инертных газов (ИГ) является обязательным и с 1978 года регламентируется решением ИМО [1, с. 457].

Все технологические контуры производства, обработки и подачи ИГ, входящие в систему ИГ танкеров являются универсальными. Они содержат однотипное оборудование и магистрали. По этой причине технические проблемы, возникающие при их эксплуатации, являются идентичными. Для их описания была разработана универсальная классификация. Она показана на схематическом рисунке 1 и состоит из трех направлений.

Первое направление – техническое. Оно определяется несовершенством конструкций используемых технических устройств. Второе направление – технологическое. Оно определяется проектировочными просчетами, а также наличием сильных недостатков в используемых технологиях подачи ИГ внутрь рабочего объема грузового трюма. Третье направление – метрологическое. Оно определяется качеством используемых средств измерения и контроля. В него также входят аварии, связанные с личностным фактором со стороны экипажа танкера.

При изучении причин аварий, возникших в системах ИГ на танкерах, был выполнен анализ аварийных отчетов. В результате установлено, что наиболее часто, возникающие на танкерах проблемы связаны с техническими недостатками системы ИГ. К этим недостаткам относятся: плохая сепарация топлива и, как следствие, слабая фильтрация тяжелых фракций в сжигаемом мазуте, что выражается в уменьшении производимых

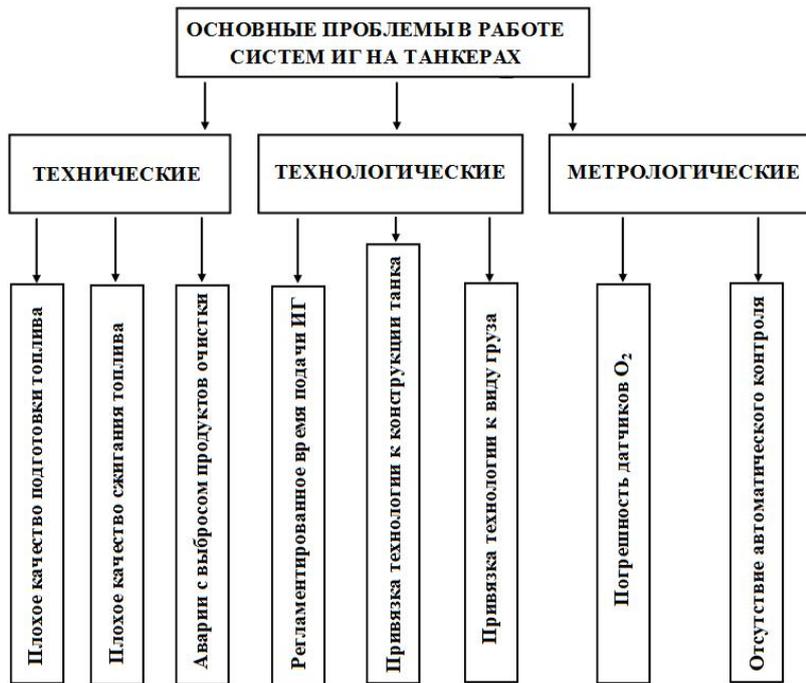


Рис. 1. Классификация проблем системы ИГ на танкерах

объемов ИГ и срыву процесса горения в рабочей камере генератора ИГ; некачественное сжигание топлива в генераторе ИГ, что выражается в повышенном генерировании сажи и заниженных объемах получаемого основного продукта горения в виде углекислого газа CO_2 .

Устранение этих недостатков может быть проведено за счет совершенствования перечисленных технологических узлов. Возможна также модернизация системы подготовки топлива за счет установки дополнительного оборудования в линии предварительной подачи топлива.

Анализ технологических недостатков в работе систем ИГ на танкерах показал, что процесс создания пожаро- и взрывобезопасной микроатмосферы внутри трюма проводится с экономической точки зрения не эффективно. Самым главным недостатком является завышенная продолжительность процесса вентиляции.

Главной причиной большой продолжительности процесса вентиляции грузовых трюмов танкера является несовершенство используемых технологий. Вытеснение воздуха из всего рабочего объема трюма происходит только за счет процессов естественной конвекции и диффузии [2, с. 12; 3, с. 27; 4, с. 11]. Решение этих проблем может быть достигнуто путем исследования процесса вентиляции грузового трюма танкера за счет использования принудительных механизмов увеличения скорости процесса массообмена воздуха и ИГ.

С учетом вышеизложенного можно констатировать, что в работе своего решения требует очень актуальная проблема. Она заключается в разработке новых принципов функционирования системы генерирования и подачи ИГ в грузовые трюмы танкеров. Именно эти газы обеспечивают существенное повышение качества эксплуатации судна за счет изменения технологии вентиляции трюмов и снижении аварий, связанных с качеством и длительностью работы таких систем.

Анализ последних исследований и публикаций. Основные принципы работы системы ИГ на танкерах базируются на сжигании дизельного топлива в генераторе ИГ. Он является отдельным устройством, которое не связано с судовым контуром подготовки топлива.

Получаемые при функционировании генератора ИГ продукты сгорания после проведения ряда операций по их очистке и снижению температуры направляются в грузовые трюма танкера.

В соответствии с Требованиями MORPOL [1, с. 457] система подачи ИГ должна обеспечивать в грузовых трюмах танкера: концентрацию кислорода в ИГ менее 5%; температуру ИГ – менее 65°C при подаче в грузовые трюма и менее 50°C при подаче в сухогрузные трюма; давление ИГ в точке входа в трюм не менее 0,11 МПа.

Восходящее вынужденное движение воздуха в трюме танкера всегда вызывается действием выталкивающей силы от подаваемых в трюм ИГ. Эта сила появляется из-за изменения плотности вследствие взаимосвязанных между собой процессов теплопереноса и передачи массы из-за различных концентраций ИГ и воздуха [5, с. 102]. Температурная стратификация потока ИГ в смеси с воздухом по высоте трюма также является одним из факторов, влияющих на скорость вытеснения воздуха из трюма судна [6, с. 107]. Именно она реализует механизм передачи энергии от ИГ к воздуху.

В работах [2, с. 215; 4, с. 357; 8, 132; 9, с. 97; 11, с. 168] показано, что в случае вынужденной конвекции поле течения в замкнутом объеме перестает зависеть от механизмов теплопередачи и текущего поля температур. Этот вывод указывает на целесообразность использования принудительной подачи ИГ в трюм судна.

В большинстве научных работ по теории конвекции обычно рассматриваются процессы тепло-массопереноса в неограниченной области без присутствия жестких границ [4, с. 29; 9, с. 45; 10, с. 19]. Только небольшое число работ описывает процесс смешанной конвекции или диффузии газов в замкнутых объемах, когда стенки, ограничивающие поток, оказывают существенное нестационарное влияние на механизм процесса переноса тепла или массы [3, с. 489; 5, с. 99; 6, с. 106; 11, с. 25]. В этих работах в основном рассматриваются потоки внутри цилиндрических труб или между плоскими вертикальными и горизонтальными стенками с различной температурой. Для решения проблемы вентиляции грузовых трюмов танкера со сложной формой поперечного сечения эти результаты подходят только в первом приближении.

В применении к вентиляции грузового трюма ИГ наиболее близкими являются результаты работы [5, с. 9]. В ней рассмотрена тепловая конвекция в трехмерном прямоугольном объеме с открытым верхом в диапазоне чисел Рэлея от 100 до 10^8 . Экспериментальным путем [5, с. 9] установлено, что:

1) 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);

2) при числах Рэлея $10^3 < Ra < 10^5$ градиент температуры вблизи стенок возрастал, а во внутренней области течения оставался постоянным. Распределение скорости для чисел Рэлея от $3 \cdot 10^4$ до $3,6 \cdot 10^6$ характеризуется вертикальной симметричностью. Рост числа Рэлея свидетельствует о пространственном увеличении по ширине зоны ядра потока.

В работах [4, с. 247, 5, с. 100, 6, с. 115] в качестве нижней границы возникновения вторичных течений в замкнутом прямоугольном объеме приводятся различные числа Рэлея. 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 [5, с. 100] при числах Рэлея $Ra > 10^6$. В этом случае возникают многоячейстые структуры со слабыми сдвиговыми течениями на их границах.

В применении к процессу конвективно-диффузионного переноса ИГ в судовых грузовых

трюмах важными являются результаты работы [6, с. 106]. В ней показано, что во время процесса термогравитационной конвекции все коэффициенты переноса являются постоянными и не зависят от температуры.

Анализ приведенных работ показал, что продолжительность процесса вытеснения воздуха из грузовых трюмов судна напрямую определяется такими параметрами, как скорость подачи струй ИГ и число Прандтля Pr . Чем выше их значения, тем сильнее будет конвективный перенос, возрастание архимедовой силы и величина эжекции воздуха вдоль оси действия струи ИГ.

Цель работы заключается в повышении эксплуатационных характеристик танкеров путем совершенствования системы генерирования и технологии подачи инертных газов в грузовые трюма танкера.

Изложение основного материала. В ходе теоретических исследований процесса вытеснения воздуха из трюма танкера за счет подачи ИГ установлено, что при использовании принудительной вентиляции возможно получить сильное восходящее течение воздуха. Этот результат является автомоделным и при изменении объемного расхода подаваемых ИГ или размеров судового грузового трюма с учетом сохранения его геометрического подобия будет оставаться всегда неизменным. Получаемые конфигурации поля скорости и поля давления также будут оставаться идентичными.

Подача ИГ моделировалась конической струей. Ее источник располагался в центре дна трюма, что в расчетах соответствовало середине нижней границы расчетной области. Длина факела струи за счет граничных условий задавалась равной пяти процентам от высоты трюма.

Принудительная подача ИГ в трюм танкера для его вентиляции должна основываться на структуре движущегося с невысокими скоростями потока воздуха внутри ограничивающих его жестких стенок грузового трюма. Поскольку основное изменение в эпюрах скорости, завихренности и температуры наблюдается только в угловых зонах грузового танка то при проведении экспериментов подача струй ИГ производилась в ядро восходящего воздушного потока. В этом случае турбулизация устойчивого течения в средней части грузового трюма танкера приводила к сокращению времени процесса его вентиляции.

В ходе экспериментов, проведенных в условиях работы танкера, во время принудительной подачи ИГ были измерены значения величины

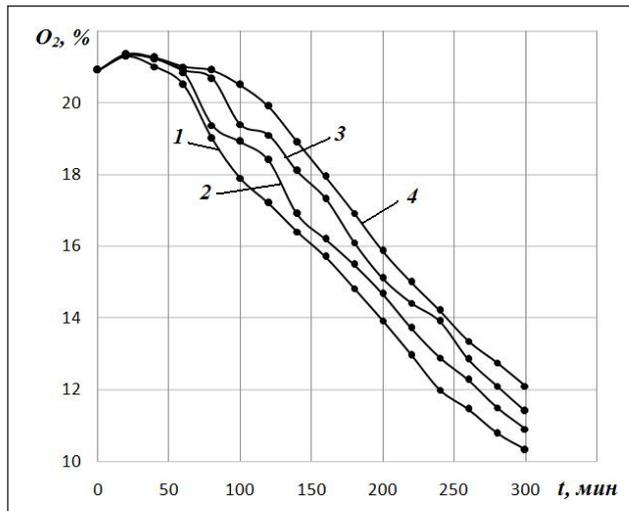


Рис. 2. Скорість змінення концентрації кисню в трюмі. Угол конусності струї ІГ: 1 – 30°; 2 – 90°; 3 – 160°; 4 – стандартна подача ІГ

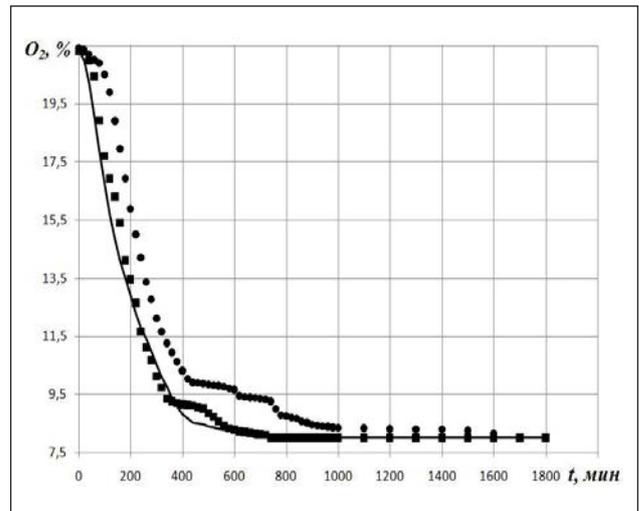


Рис. 3. Змінення концентрації кисню в трюмі танкера. Подача ІГ: ● – стандартна; ■ – примусовая; сплошна лінія – расчёт

концентрації кисню на виході з грузового трюма. Вимірювання проводились одночасно в шести грузових трюмах. На рисунку 2 приведені графіки, які відповідають осередненню цих даних. Як видно на графіку найкращі результати були отримані при углі розпилення ІГ рівним 30°. В цьому випадку значення концентрації кисню всередині трюма були найменшими. Це пояснюється більшою дальністю дії струї вдуваних ІГ і відповідно збільшенням зони конвективного взаємодії ІГ з повітрям. Як видно на рис. 2 характер змінення концентрації кисню всередині трюма во всіх чотирьох випадках залишався ідентичним. Цей результат дозволяє зробити висновок, що вплив кутів розкриття струй ІГ на характер витіснення повітря з трюма не є основним, а сам процес залежить в основному від ступеня щільної стратифікації ІГ всередині робочого простору трюма.

В ході експериментів була отримана залежність, що відображає характер зменшення за часом концентрації кисню в трюмі судна при примусовій подачі ІГ. Її порівняння зі стандартною вентиляцією трюма танкера і результатами розрахунків на основі математичної моделі показано на рисунку 3. Експериментальні дані на цьому графіку, були отримані одночасно, коли два трюма заповнювались ІГ за стандартною технологічною схемою і з використанням примусової вентиляції.

Аналіз результатів показує, що використання примусової подачі призводить до кількісного, але не якісного розходження в

зміненнях за часом концентрації кисню всередині трюма. Використання процесу примусової подачі ІГ привело до отримання найголовнішого і основного результату – скорочення часу, витрачаємого на вентиляційну обробку трюмів танкера перед отриманням нового вантажу. На графіку видно, що розходження між кривими починається через 80 хвилин після початку процесу вентиляції трюма. Вихід на стаціонарне значення концентрації кисню менше 8% спостерігається через 740 хвилин після початку процесу вентиляції трюма. Аналогічна величина концентрації в ході природної вентиляції трюма за цей період часу була більшою і становила 9,25%. Її вихід на стаціонарне значення спостерігався приблизно через 1700 хвилин після початку процесу вентиляції трюма. В процентному відношенні покращення процесу вентиляції трюма при переході від природної до примусової вентиляції трюма становило 13,5%. Скорочення витраченого часу при інших рівних умовах становило 56,47%.

Висновки. 1. Однотипність технологічних контурів і обладнання, використовуємого для виробництва, обробки і подачі ТГ на танкерах проявляється в ідентичності технічних проблем, що виникають при їх експлуатації.

2. На танкерах цілесообразно використовувати примусову подачу ІГ в трюмі судна з кутом розпилення в сопловій насадці рівним 30°. Через збільшення зони конвективного взаємодії ІГ з повітрям значення концентрації кисню всередині трюма будуть найменшими.

3. Использование процесса принудительной подачи ИГ приводит к сокращению времени вентиляционной обработки трюмов танкера на 56,47%.

4. Основная направленность дальнейших исследований должна быть связана с совершен-

ствованием системы подготовки топлива, используемого в судовом генераторе инертных газов. Повышение степени диспергирования может быть достигнуто за счет использования процесса кавитационной обработки топлива перед его сжиганием.

Список литературы:

1. Гидрогазодинамика и процессы теплопереноса: Сб. науч. тр. / Ред. кол. Н.Д. Коваленко. Киев : Наукова думка, 1986. 152 с.
2. Годштик М.А., Штерн В.Н., Яворский Н.И.. Вязкие течения с парадоксальными свойствами. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1989. 336 с.
3. Андерсон Дж. Таннехилл Р. Плетчер. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. М. : Мир, 1990. Т. 1-2. 726 с.
4. Джалаурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. М. : Мир, 1983. 400 с.
5. Elder J.W. Turbulent free convection in a vertical slot. Journal of fluid mechanics. March 2006. Volume 23. Issue 1. pp. 99–111.
6. 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.
7. Международная конвенция MARPOL 73/78.
8. 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.
9. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений / Белов И.А., Исаев С.А. // СПб. Судостроение. 2001, 108 с.
10. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. Г.Н. Абрамович. М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1960. 715 с.
11. Абрамович Г.Н. Турбулентное смешение газовых струй / [Г.Н. Абрамович, С.Ю. Крашеников, А.Н. Секундов, И.П. Смирнова]. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1974. 272 с.

Brazhnik I.D. MODERNIZATION OF THE VENTILATION PROCESS OF THE TANKER CARGO HOLDS WITH THE AID OF THE INERT GAS SYSTEM

In the article ship technological operation was considered. It is connected with the ventilation process of the cargo holds of the tanker by means of inert gases and in accordance with international law is obligatory. This procedure must be performed each time when ship receives a new type of cargo. Due to the specific features of the process and the presence of various technical problems on the vessels, the ventilation of the holds is provided with low quality. It is characterized by high duration and very low efficiency. In most cases, such shortcomings are reflected in the very long duration of the process of air remove from the cargo hold of the tanker, as well as the presence of residual air concentrations above the levels established by international law.

It is shown in the article that during the research works it was proposed to use the forced ventilation of the hold due to the new technology of supplying inert gases to the hold of the vessel. The analysis of this ventilation process of tankers cargo holds was carried out on the basis of the results of theoretical and experimental studies in the real conditions of the vessel operation.

It is stated that the safe micro-atmosphere creation, from a fire and explosive point of view, inside the cargo hold of the tanker during cargo operations can be achieved in a shorter period of time. The use of forced mechanisms to increase the speed of the process of mass exchange of air and inert gases is based on the use of inert gas submission technology in the form of jets.

It is shown that the forced ventilation of the hold must be based on the distribution of the temperature field and the structure of the flow, that is moving at low speeds inside the rigid walls of the hold, which limit it. The flow of inert gas jets into the core of the flow causes a turbulence in a steady flow in the middle area of the tanker's cargo hold and shorten its ventilation process.

Key words: tanker, inert gas system, forced ventilation, oxygen concentration, cargo hold.