

**Малахова Д.О.**

Одесский национальный политехнический университет

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ВЕНТИЛЯЦИИ ГРУЗОВЫХ ТРЮМОВ ТАНКЕРОВ

*У статті розглядається проблема впровадження нової інформаційної технології та інформаційного забезпечення процесу вентиляції вантажних трюмів на танкерах. Така проблема досі залишається практично не вирішеною науковцями і потребує всебічного розгляду як з технічного боку, так і з боку інформатики. Впровадження інформаційних технологій для відображення параметрів процесу вентиляції є дуже суттєвим, оскільки досі відсутні якісні та надійні методи обробки даних процесу інертизації чадними газами вантажних приміщень танкера. Методи, що використовуються зараз, характеризуються відсутністю інформативності подання даних та передбачають значні витрати з розрахункового погляду.*

*При експлуатації системи інертних газів танкера головне практичне завдання полягає у зменшенні концентрації кисню в трюмі до нормативних значень. Для скорочення тривалості процесу може бути застосована технологія примусової вентиляції. Досі в такому робочому процесі на морських суднах інформаційні технології не застосовувались, але саме завдяки їх впровадженню можна суттєво скоротити час вентиляції та зменшити затрати на паливо, що згорає в системі інертних газів танкера.*

*У статті сформульована умова для побудови двовимірної візуалізації розподілу ізоліній під час обробки чотиридимірного масиву даних. Такі ізолінії комплексно відображають розподіл концентрації кисню всередині трюму сукупно зі значеннями тиску. Це впливає на остаточне видалення повітря з робочого обсягу.*

*Доведено, що початкові масиви даних можливо отримати під час кінцево-різницевого рішення системи диференціальних рівнянь ізоентропічного руху повітря в трюмі танкера сумісно з рівнянням нерозривності.*

*Для практичного використання на танкерах на основі розробленого методу візуалізації було створено програмний комплекс.*

**Ключові слова:** візуалізація, обробка даних, програмний комплекс, танкер, інертні гази, концентрація кисню, вентиляція.

**Постановка проблеми.** В більшості технологічних процесів, використовують інформаційні технології для візуалізації текущих параметров, подразумевается представление окончательного результата в наиболее удобном для пользователя виде. Применимо к различным термо- или гидродинамическим процессам можно констатировать, что получаемые в конечном итоге поля температуры, скорости, давления, завихренности и т.п. очень часто характеризуются многомерными и большими по объемам массивами численных данных. Все используемые методы их обработки требуют наличия у пользователя определенных знаний и зачастую характеризуются слабой информативностью или завышенными требованиями к вычислительной технике.

На современном этапе развития информационных технологий в гидродинамических процессах наибольшее распространение получили два типа методов:

– визуализация экспериментального процесса различными способами фотографирования;

– численная обработка массивов данных, характеризующих рассматриваемый процесс.

В первом типе наиболее информативные и достоверные результаты можно получить при помощи оптического метода визуализации физических процессов с внедрением поверхностного плазмонного резонанса [1, с. 47], использования «световых ножей», введения красящих добавок, инъекции струек дыма, шелковых нитей, гелиевых пузырьков или механических включений в движущуюся среду с использованием оптических методов наблюдения [2, с. 5].

Во втором типе наиболее часто используются геометрические и топологические методы, метод главных компонент, факторный, кластерный, дискриминантный анализ [3, с. 64].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Не смотря на существование целого научного направления под названием «вычислительная гидродинамика» (CFD), можно констатировать, что работы, посвященные методам визуализации получаемых расчетных данных,

встречаются достаточно редко. Наиболее полное и качественное описание современного состояния вопроса приводится в работе К.Н. Волкова [2, с. 7], однако в нем присутствуют некоторые неточности. Например, в качестве метода визуализации расчетных данных приводится метод предиктора-корректора, который может использоваться только на стадии численной схемы решения уравнений. Эта стадия соответствует получению массива расчетных данных, а не его обработке с целью построения картины визуализации поля течения.

Практически во всех научных статьях и монографиях, относящихся к визуализации гидродинамических процессов, используется только два варианта построения графических образов получаемых полей скорости, давления, линий тока, завихренности и т.п. Их выбор определяется только самими исследователями, при этом сами методы не поддаются качественному анализу или оценке с точки зрения информационных технологий.

Первый вариант – это графический набор сплошных или прерывистых линий, которые отображают визуальную картину течения. С их помощью можно увидеть места отрыва потока от поверхностей или положение вихрей в потоке. Информация о конкретных значениях отображаемого параметра иногда указывается на выборочных линиях либо задается цветом.

Второй вариант – это отображение искомого параметра с использованием технологии окрашивания данных с классическим переходом от синего цвета, соответствующего малым числовым значениям, до красного, соответствующего максимальным значениям.

Примеры двух способов визуализации, взятые из работ [2, с. 5; 3, с. 64; 5, с. 18], показаны на рисунке 1. В обоих случаях информативность представления данных не позволяет проводить их количественный анализ. На основе выполненной

визуализации сложно сформулировать практические выводы о характерных особенностях рассматриваемых течений.

На основе анализа современных исследований в области визуализации гидродинамических процессов можно констатировать отсутствие надежного метода обработки данных. Известные методы характеризуются отсутствием информативности подачи данных и подразумевают высокие затраты с вычислительной точки зрения.

Особый интерес представляет собой использование информационных технологий в применении к морским судам. С периодичностью не менее двух раз в месяц на танкерах проводятся операции, связанные с вентиляцией грузовых трюмов за счет заполнения инертными газами (продуктами горения судового топлива). Главная практическая задача в этом случае состоит в снижении концентрации кислорода в трюме до нормативных значений. Для сокращения длительности процесса может применяться технология принудительной вентиляции [6, с. 18].

В таком рабочем процессе на морских судах до настоящего времени информационные технологии не применялись. Визуализация численных данных, отображающих качество и скорость процесса заполнения рабочих объемов трюмов танкера инертными газами, приведет к получению самого главного результата, то есть к повышению рентабельности работы судна. Это будет достигнуто за счет контролируемого сокращения длительности процесса вентиляции трюма танкера и затрат топлива на его проведение [7, с. 31].

**Цель работы** заключается в формулировке основных принципов метода визуализации численных массивов данных при отображении процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с выделением и двумерным графическим отображением динамики изменения главных определяющих параметров.

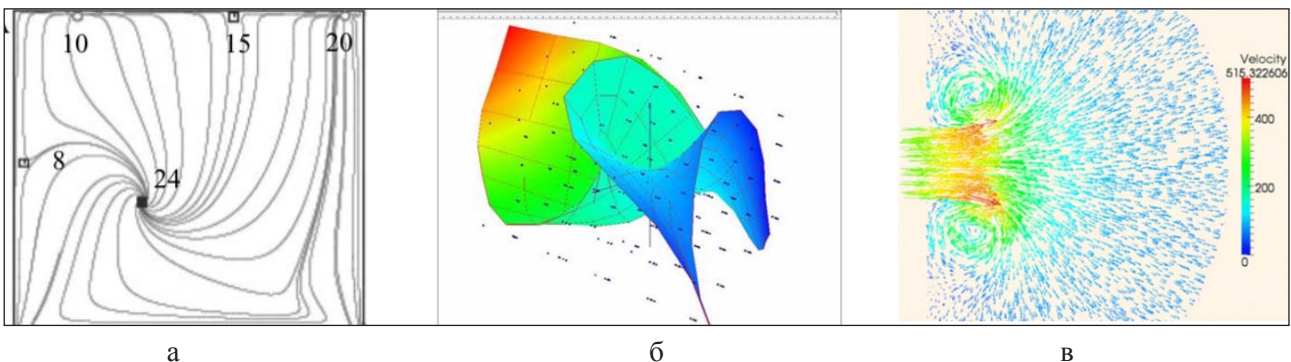


Рис. 1. Примеры визуализации гидродинамических процессов: а – линии тока при движении жидкости по стенке [2]; б – поле давления в потоке [5]; в – вытекание струи в неограниченное пространство [3]

**Изложение основного материала.** Предлагаемый новый подход к решению задачи о визуализации процесса вентиляции грузового трюма танкера основан на пространственном выделении и построении характерных изолиний. В качестве критерия для построения таких изолиний предлагается использовать получаемое при обработке четырехмерного массива данных значение градиента двух основных рабочих параметров – величины концентрации кислорода  $C_{O_2}$  и давления  $P$ . Массив данных определяется размерностью задачи – тремя пространственными координатами ( $x, y, z$ ) с соответствующими индексами ( $i, j, k$ ) и одной временной ( $t$ ) с индексом ( $n$ ).

Основным условием для построения двумерной визуализации получаемого распределения изолиний является совпадение в относительных единицах двух параметров в наборе точек, через которые будет проходить изолиния. Фактически для построения в данный момент времени визуализации необходимо, чтобы выполнялась такая система:

$$\left. \begin{aligned} (\nabla C_{O_2})_{i,j,k}^n &= const \\ (\nabla P)_{i,j,k}^n &= const \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\nabla$  – оператор Лапласа;  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода, %;  $P$  – давление в точке, отнесенное к атмосферному давлению, %.

Исходные массивы данных можно получить при конечно-разностном решении системы дифференциальных уравнений изоэнтропического движения воздуха в трюме танкера. В тензорной форме записи она имеет такой вид:

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = g \left( \frac{\partial \rho}{\partial C_i} \right) (C_i - C'_i) - \nabla P + \mu \nabla^2 V_i, \quad (2)$$

где  $V_i$  – текущая проекция скорости, м/с;  $P$  – давление, Па;  $C_i, C'_i$  – концентрация воздуха в трюме и в окружающей среде, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

При заданных начальных и граничных условиях эти уравнения решаются совместно с таким уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Исходный физический объем грузового трюма танкера моделируется при помощи неравномерной прямоугольной сетки. Она показана на рисунке 2.

Использование численного подхода для построения визуализации при работе танкера хорошо согласуется с результатами, получаемыми в ходе непосредственных измерений распределения концентрации в трюме.

Сравнение результатов измерения и расчетных данных, которые составляют основу массива, обрабатываемого при визуализации, показано на рисунке 3.

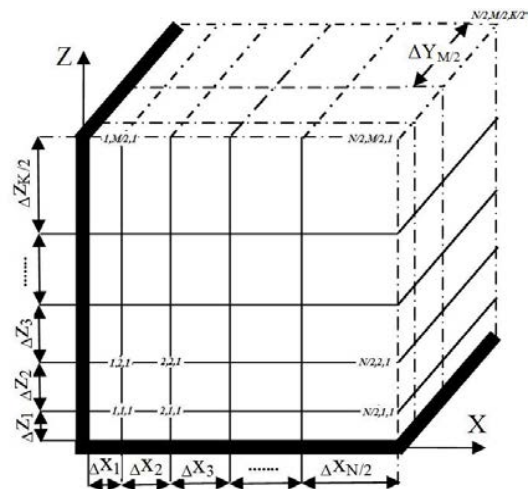


Рис. 2. Дискретное представление грузового трюма танкера

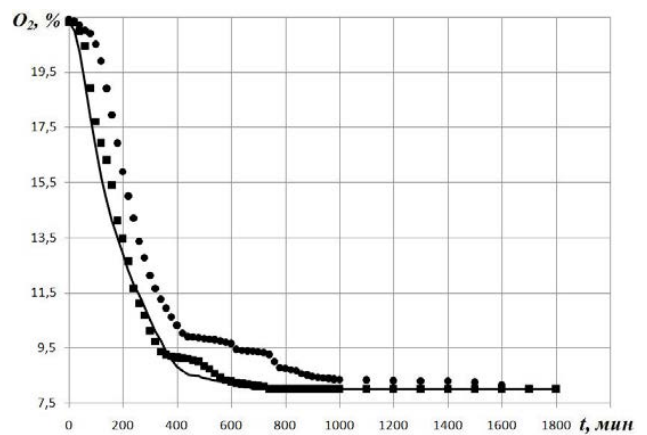


Рис. 3. Сравнение результатов расчета и измерений: ● – естественная вентиляция трюма; ■ – принудительная вентиляция трюма; сплошная линия – результаты моделирования

В конечном итоге для практического использования на танкерах результатов выполненных исследований на основе разработанного метода визуализации был разработан программный комплекс. Исходные параметры для визуализации процесса вентиляции трюма необходимо вводить в ручном режиме. Как показано на рисунке 4 (а), где отображено окно ввода данных, к ним относятся линейные размеры грузового трюма, начальная температура инертных газов и воз-

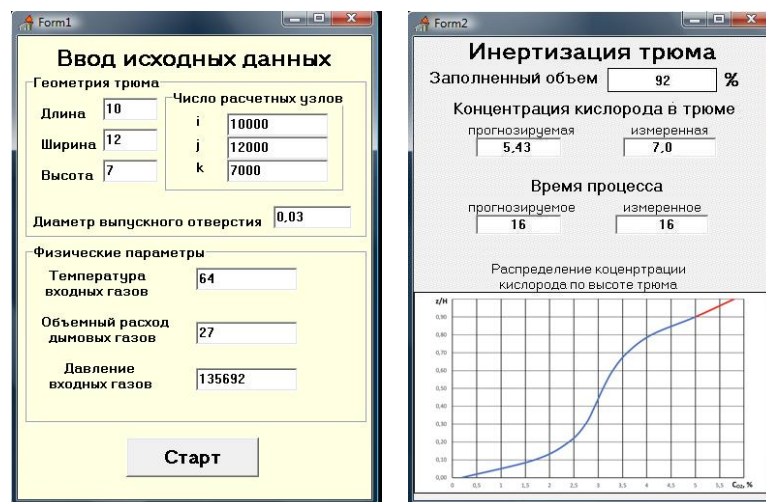
духа в трюме, количество расчетных узлов. С учетом разработанного алгоритма в окне вывода, показанном на рисунке 4 (б), пользователь может получать данные об объемном наполнении грузового трюма и контролировать параметры концентрации воздуха по его высоте.

Использование информационных технологий в комбинации со стандартным измерительным оборудованием для контроля процесса вентиляции грузовых трюмов танкера позволяет контролировать качество самого процесса в целом. Характерным примером являются данные, отображенные на рисунке 5. На нем показано распределение концентрации кислорода в самом верхнем поперечном сечении трюма. Как видно в момент времени, соответствующий полному заполнению трюма инертными газами, средства измерительной аппаратуры показывали, что концентрация кислорода превышает допустимые 5% и составляет 5,4%. Однако интегрирование кривой, соответствующей всему расчетному сечению, показывает, что процесс завершен, поскольку концентрация кислорода составляет 4,08%. Сравнение аналогичных данных, полученных при установке датчиков концентрации не вблизи стенок трюма, а в его центральной части, приводит к практически полному совпадению.

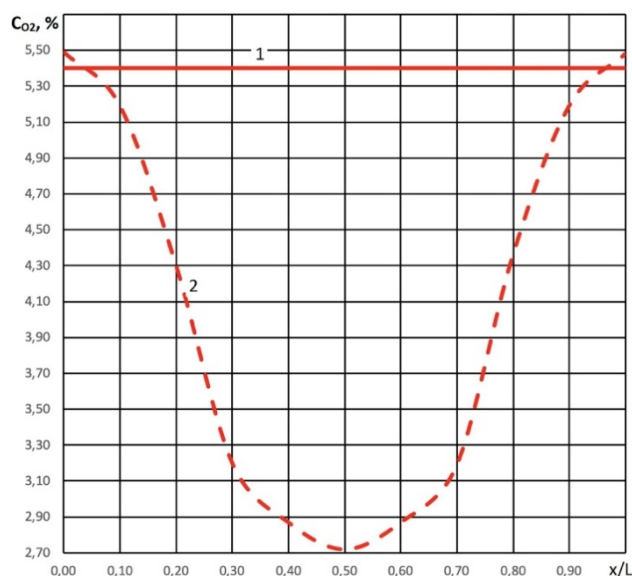
В ходе исследований была использована информационная обработка текущих результатов процесса заполнения грузового трюма танкера инертными газами. Установлено, что наиболее качественные результаты измерительное оборудование дает при расположении створов для отбора газовых проб на расстоянии, превышающем 10% ширины или глубины трюма (в зависимости от конструкции танкера). В этом случае числовые значения остаточной концентрации кислорода, получаемые при помощи разработанного программного комплекса и за счет измерений, совпадают полностью.

**Выводы** и перспективы дальнейших исследований.

1. Разработанный метод визуализации потоковых численных данных, отображающих процесс вентиляции грузовых трюмов танкера, позволяет контролировать любую стадию заполнения трюма инертными газами. За счет использования предлагаемой информационной технологии отпа-



а б  
**Рис. 4. Программный комплекс:**  
 а – окно ввода данных; б – окно пользователя



**Рис. 5. Сравнение значений концентрации кислорода в трюме: 1 – результат использования информационных технологий; 2 – показания газоанализатора на выходе из трюма**

дает необходимость выполнения такого контроля силами экипажа судна.

2. В соответствии с результатами визуализации при эксплуатации танкера измерительные створы для контроля величины концентрации кислорода в грузовом трюме необходимо удалять от стенок танкера на расстояние не менее 10% от текущего характерного размера (длины или ширины). Получаемые значения в этом случае будут характеризовать общую картину вытеснения воздуха из его рабочего объема.

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

створованим програмним продуктом в області універсального підходу до конструктивних особливостей танкерів. Не всі танкери характеризуються прямокутною формою вантажного трюма,

по тому специфіка поведінки подаваних інертних газів повинна враховуватися на рівні застосовуваних в цьому випадку інформаційних технологій.

#### Список литературы:

1. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С., Толкачев А.В., Ведяшкина А.В. Возможности метода поверхностного плазмонного резонанса для визуализации физических процессов в наноразмерных пограничных слоях жидкости. *Научная визуализация*. 2017. Квартал 1, Том 9, № 1. С. 41–49.
2. Волков К.Н. Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014. № 3 (91). С. 1–10.
3. Бондарев А.Е. Анализ многомерных данных в задачах вычислительной газовой динамики. *Научная визуализация*. 2014. Квартал 4, Том 6, № 5. С. 61–68.
4. Afendikov A.L., Khankhasaeva Ya.V., Lusky A.E., Menshov I.S., Merkulov K.D. Computation and visualization of flows past bodies in mutual motion. *Scientific Visualization*. 2016. Quarter 4, Vol 8, № 4. P. 128–138.
5. Знаменская И. Взаимодействие численной и экспериментальной визуализации потоков. *Научная визуализация*. 2013. Квартал 3, Том 5, № 3. С. 1–16.
6. Malakhov O., Kolegaev M., Malakhova D., Maslov I., Brazhnik I., Gudilko R. Improvement of working parameters of ships with the use of water-fuel emulsions. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 6, N 3 (44). Chemical engineering. P. 14–20.
7. Малахов А.В., Колегаев М.А., Бражник И.Д. Совершенствование эксплуатационных показателей системы инертных газов на танкерах. *Вісник ХНТУ*. № 2 (65), 2018 р. С. 27–34.

#### Malakhova D.O. INFORMATION TECHNOLOGIES FOR CONTROLLING THE VENTILATION PROCESS OF TANKER HOLDS

*The article devoted to the problem of introduction of new information technology and information support for the process of ventilation of cargo holds on tankers. Such a problem remains almost unconsidered so far and needs comprehensive consideration both from the technical approach and from the software point of view. The introduction of information technology to reflect the parameters of the ventilation process is very important, because up to date there are no qualitative and reliable methods for processing the data of the process of inertization with the flue gases of the cargo rooms of the tanker. The methods used to date are characterized by a lack of informativeness in the submission of data and involve significant costs from the calculation point of view.*

*When operating the inert gas system of the tanker the main practical task is to reduce the oxygen concentration in the hold to normative values. To cut the process time may be introduced forced ventilation technology. Up to date, information technology has not been used in such a workshop on ships, but through its implementation it is possible to significantly reduce ventilation time and reduce the fuel consumption of the inert gas system of the tanker.*

*The article formulates a condition for constructing a two-dimensional visualization of the isolines distribution during the processing of a four-dimensional data massive. Such isolines comprehensively reflect the distribution of oxygen concentration inside the hold together with the pressure values that affect onto the final removal of air from the working volume.*

*It is shown that the initial data massives can be obtained in the finite-difference solution of the system of differential equations of isoentropic air movement in the tank hold together with the continuity equation.*

*For practical use on tankers based on the developed visualization method, a software complex was created.*

**Key words:** visualization, data processing, software, tanker, inert gases, oxygen concentration, ventilation.