

КЛАССИФИКАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ

Малахова Д. О., аспирантка Одесского национального политехнического университета, e-mail: diana.dizzy.ds@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4833-1485

В статье приведено описание разработанной методики выбора уровня сложности основных уравнений гидродинамики в программных продуктах, которые разрабатываются для использования в информационных технологиях. Показано, за счет реализации каких процессов обработки во время построения образов визуализации, числовые данные могут отражать моделируемый процесс с различным уровнем сложности. Сформулированы основные критерии, на основании которых возможно получение информации для последующего анализа конкретных технологических процессов с участием движущегося потока жидкости или газа. Показано, каким образом возможно контролировать качество построения образа визуализации на основе потоковых данных по отношению к реальной картине течения жидкости или газа.

Ключевые слова: информационные технологии, база данных, система уравнений движения, образ визуализации, поле скорости, градиент изменения параметра.

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.115-123

Постановка проблемы. Технологии современных методов визуализации гидродинамических потоков характеризуются различными уровнями качества получаемых результатов [1]. До сих пор отсутствуют надежные способы оценки получаемых результатов [2]. Полноценное воспроизведение характерных особенностей движущегося потока подразумевает использование надежных алгоритмов решения основных уравнений движения, но при этом сами уравнения могут быть записаны в различных формах и соответствовать решению только ограниченного класса задач [3]. Для создания универсального подхода к визуализации гидродинамических потоков необходимо сформулировать общие принципы формирования информационной базы данных исходных характеристик потока.

В настоящее время математический аппарат, который используется для описания гидродинамических процессов может быть условно разделен на четыре уровня. Такое разделение предлагается к дальнейшему использованию исходя из теоретических основ информационных технологий и возможностей современного вычислительного обеспечения процесса их реализации. Под вычислительным обеспечением в данном контексте подразумеваются: мощности современных компьютеров; алгоритмы, определяющие скорость работы с базами численных данных; математические методы решения нестационарных и нелинейных систем дифференциальных уравнений.

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ современной литературы по визуализации гидродинамических потоков показывает, что с точки зрения информационных технологий эта проблема остается практически полностью не раскрытой. Наиболее хорошо это подтверждается обзорами методов, которые выполнены в работах [1–2, 4]. Большая часть научных исследований, проводимых в этой области, обычно посвящена архитектуре программных комплексов [5] или процессингу, который в нем используется [6]. При этом не известны работы, которые посвящены методологии отображения численных данных для описания пространственных течений. Также нет публикаций, в которых присутствуют рекомендации по выбору комплексных характеристических параметров для визуализации числовых данных, получаемых при решении основных уравнений гидродинамики. Большая часть методов визуализации гидродинамических потоков основана на аппроксимации обрабатываемых численных данных (расчета, сканирования и т.п.).

Основные публикации в области построения картин гидродинамических течений обычно относятся к применению различных методов обработки экспериментальных

изображений, которые были получены оптическим путем. Больше применение в таком направлении уделяется лазерным методам, а также термографической визуализации. При этом все эти методы обладают самым главным недостатком – отсутствием информативности. Практически все образы визуализации, которые присутствуют в научных публикациях, не предоставляют возможность проводить количественный анализ. Получаемые качественные характеристики обычно могут использоваться только узконаправленными специалистами.

Наибольшей информативностью обладает классический подход с использованием линий тока, однако, кроме визуального отображения двумерного поля течения, такой способ не представляет возможности получения количественных оценок. Преобразованные переменные вида “потенциал ψ – функция тока ϕ ” с точки зрения качества отображения реальной картины характеризуются ограничением по размерности задачи. В случае визуализации распределения гидродинамического параметра на плоскости корректность такого построения подтверждается. В двумерной плоскости отображение “ ψ – ϕ ” является однозначным, однако в случае трехмерного пространства корректность отображения линии тока в силу неоднозначности ее определения является спорной. При пространственной (трехмерной) визуализации движущейся жидкости или газа линии тока построить невозможно.

Формулировка цели, задачи, объекта, предмета и методов исследования. Целью работы является разработка основных принципов структурирования математического аппарата для создания программных продуктов в сфере информационных технологий, которые используются для визуализации картин движения потоков жидкости.

Основной задачей исследования является установление иерархической структуры уравнений, описывающих гидродинамические процессы с целью последующего использования в информационных технологиях при построении картин визуализации течений жидкостей или газов.

Объектом исследования является процесс информационной обработки и визуализации многомерного массива данных, получаемых при моделировании гидродинамических течений.

Предметом исследования является совокупность методов получения данных, модели гидродинамических потоков и информационная технология визуализации их картины течения.

В работе использованы следующие методы исследований: метод численной визуализации, метод сравнительного анализа, метод конечного объема, метод конечных разностей, метод расщепления, численный метод аппроксимации, метод кластеризации.

Основные результаты. С точки зрения разработки различных программных продуктов для последующего использования информационных технологий в различных гидродинамических рабочих процессах очень важным является универсализация подхода к выбору математического аппарата. Уровень сложности уравнений определяет в первую очередь затраты и ресурсы машинного времени, а также влияет на качество анализа получаемых в результате образов визуализации или распределений характерных параметров течений.

С точки зрения информационных технологий современный уровень моделирования течений на основе систем дифференциальных уравнений, которые описывают поведение жидкостей и газов можно разделить на четыре уровня сложности. Различие между этими уровнями заключается в количестве слагаемых, входящих в уравнения, которые описывают перемещение и состояние потока. Каждый уровень отличается от предыдущего качеством воспроизведения физических особенностей движения, а также учетом вязкости в локально выделенной и/или всей области течения и градиента изменения кинематических характеристик потока во времени [7–8]. С точки зрения затрат на реализацию информационных технологий в программных продуктах, виртуально отображающих реальные производственные процессы, эти уровни можно разделить следующим образом:

1 уровень сложности. Он характеризуется тем, что все дифференциальные уравнения, которые могут быть на нем использованы, не содержат слагаемые, содержащие вязкость моделируемого потока. При разработке на их основе программных продуктов следует учитывать, что получаемые в конечном итоге образы визуализации не будут отображать проявление вязкостных эффектов. Такие информационные технологии предоставляют пользователю строить образы визуализации только на качественном уровне. Такой метод получения данных для визуализации не подразумевает проведение на окончательном этапе численного анализа. Визуализация поля течения потока не может быть основой для получения количественных выводов.

К уравнениям первого уровня можно отнести одномерное уравнение Бернулли, которое иногда обозначают термином – интеграл Эйлера. Его записывают в виде:

$$dz + \frac{dP}{\rho g} + d\left(\frac{V^2}{2g}\right) = 0, \quad (1)$$

где z – геометрический, $\frac{P}{\rho g}$ – пьезометрический и $\frac{V^2}{2g}$ – скоростной напоры, м.

Уравнение (1) находит свое применение в простейших инженерных приложениях. При разработке информационной технологии для построения картин визуализации гидродинамических потоков его использование затруднительно.

Качественные результаты, которые в первом приближении могут использоваться для построения поля скорости или давления движущегося потока, позволяет получать система уравнений Эйлера [9]. В тензорной форме записи эта система имеет вид:

$$\left. \frac{dV_i}{dt} + V_j \frac{dV_i}{dx_j} = \frac{1}{\rho} \frac{d\tau_{ij}}{dx_j} + \frac{1}{\rho} F_i \right\}, \quad (2)$$

где V_i, V_j – компоненты скорости, м/с; x_j – текущая координата, м; τ_{ij} – компонента тензора напряжений, Па; F_j – составляющая массовой силы, Н.

При построении образов визуализации движущегося потока с неизменной плотностью ($\rho = const$) система (2) позволяет учитывать произвольный характер действия массовых сил (сил инерции, тяжести и т.п.). Качество получаемого решения и картины его визуализации будет напрямую определяться количеством расчетных узлов (дискретным набором точек), задействованных в программном комплексе.

2 уровень сложности. На втором уровне визуализации гидродинамических потоков нужно использовать две системы уравнений движения потока жидкости или газа. Первая система соответствует пограничному слою. В этом случае считается, что все гидродинамические эффекты порождаются вязкостью движущегося потока и проявляются в очень тонкой области, которая граничит с жесткими поверхностями. Вторая область течения принимается такой, что вся жидкость или газ в ней являются идеальными [7]. Поскольку во второй области моделируемого течения вязкость отсутствует, то она может описываться уравнениями Эйлера с предыдущего первого уровня сложности.

Уравнения пограничного слоя, соответствующие 2 уровню сложности, называют системой приближенных уравнений Прандтля и в декартовой системе координат записывают в виде:

$$\left. \begin{aligned} V_x \frac{dV_x}{dx} + V_y \frac{dV_x}{dy} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + \frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dy} \\ \frac{dP}{dy} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где P – давление, Па.

3 уровень сложности. На этом уровне сложности при построении картины визуализации потока необходимо использовать стационарные многомерные уравнения движения.

С точки зрения информационной технологии визуализации гидродинамических процессов этот уровень соответствует полной картине движения потока. Его рабочие

характеристики принимают установившимися во времени. В этом случае нужно использовать систему уравнений движения Навье-Стокса. В тензорной форме записи три уравнения этой системы имеют вид [7–8]:

$$V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + 2\nu\bar{\nabla}S_v. \quad (4)$$

4 уровень сложности. Этот уровень с точки зрения информационных технологий является самым сложным. При его реализации требуется использование всей вычислительной мощности используемого оборудования [10]. В этом случае информационные потоки и рабочие массивы данных являются максимальными по своим объемам. На этапе реализации программного комплекса при использовании четвертого уровня требуется использование всех доступных ресурсов памяти.

На четвертом уровне используются нестационарные многомерные уравнения движения Навье-Стокса или нестационарные многомерные уравнения движения Рейнольдса, дополняемые моделями турбулентности в виде дополнительных систем дифференциальных уравнений с эмпирическими коэффициентами.

В тензорной форме записи нестационарные уравнения Навье-Стокса с учетом действия из массовых сил только силы тяжести имеют вид:

$$\frac{dV_i}{dt} + V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + 2\nu\bar{\nabla}S_v, \quad (5)$$

где S_v – тензор скоростей деформации, П.

В тензорной форме записи нестационарные уравнения Рейнольдса имеют вид:

$$\frac{dV_i}{dt} + V_i(\bar{\nabla}V_j) = -g\bar{k} - \bar{\nabla}\left(\frac{P}{\rho}\right) + \frac{1}{\rho}\bar{\nabla}(T_{kl} + T_t), \quad (6)$$

где T_{kl} – тензор квазиламинарных напряжений, Па; T_t – тензор турбулентных напряжений, Па.

Форма записи трех тензоров, входящих в системы уравнений (5)–(6) широко представлена в литературе по гидромеханике и при необходимости может взята из работ [3, 7–9].

Записанная система уравнений Рейнольдса (6) содержит три уравнения с десятью неизвестными функциями и является незамкнутой. Для ее замыкания чаще всего используют k - ε модель турбулентности. В этой модели параметр k – это кинетическая энергия турбулентных пульсаций, а параметр ε соответствует скорости диссипации турбулентной энергии.

Дифференциальные уравнения k - ε модели турбулентности имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dk}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{2} \nu_e \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_e}{\delta_\Sigma} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left[\frac{1}{2} C_1 \nu_e \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - C_2 \varepsilon \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В уравнениях системы (7) коэффициент эффективной вязкости ν_e принимается равным сумме коэффициентов ламинарной ν_l и турбулентной вязкости ν_t :

$$\nu_e = \nu + \nu_t; \quad (8)$$

$$\nu_t = C_D k^2 / \varepsilon. \quad (9)$$

Значения эмпирических постоянных входящих в уравнения системы (7) могут изменяться в зависимости от вида моделируемого течения. Обычно наиболее качественные результаты можно получить со следующими числовыми коэффициентами: $C_D=0.09$, $\delta_\Sigma=1.3$, $C_1=1.44$, $C_2=1.9$.

Во время проведения анализа современного уровня развития математического аппарата был сделан главный акцент на разработку классификационных признаков дифференциальных уравнений движения жидкости и газа с точки зрения применения в информационных технологиях. Не смотря на приведенное выше описание четырех уровней сложности необходимо отметить, что применения в технологии визуализации гидродинамических потоков существует другое научное направление. Оно является очень важным с точки зрения как решения дифференциальных уравнений движения, так и для построения картин визуализации. Второе методологическое направление базируется на применении в информационных технологиях малоизвестного метода расщепления.

В большинстве случаев при решении теоретическим путем дифференциальных уравнений гидродинамики в виде (2) и (4)–(7) или при анализе сложных процессов в силу неоднозначности явления получить решение (окончательный вывод про природу явления) в явном виде довольно сложно или невозможно. По этой причине очень удобным является использование математического метода дробных шагов или метода расщепления [11–12].

Основой этого метода является тот факт, что процесс движения жидкости или систему уравнений, которая его описывает, можно разделить на совокупность более простых процессов или систем уравнений. В большинстве случаев наиболее обоснованным является проведение расщепления по пространству во времени и по физическим процессам. Например, в случае 3-мерного пространства одна выходная система уравнений движения может быть разделена на совокупность трех одномерных систем уравнений. Количество получаемых таких одномерных систем всегда будет соответствовать конечной размерности задачи. При построении картин визуализации поля течения нестационарных гидродинамических потоков такое расщепление системы необходимо выполнять на каждом временном уровне.

В применении к информационной технологии визуализации гидродинамических процессов этот метод необходимо применять на последнем уровне информационного блока, который отвечает уже за получение потоковой базы данных для построения образа визуализации.

Если гидродинамический процесс описывается системой дифференциальных уравнений и изменения его параметров происходят во времени постоянно (т.е. время изменяется в пределах от 0 до T), то можно допустить, что есть функция V , которая непрерывно изменяется в промежутке времени от 0 до T . В этом случае можно записать, что для $0 \ll t_1 \leq t_2 \leq T$ будет использоваться равенство:

$$V(t_2) = S(t_2, t_1) V(t_1), \quad (10)$$

где $S(t_2, t_1)$ – оператор перехода на временном промежутке $[t_2, t_1]$.

Поскольку метод дробных шагов (расщепления) базируется на принципе Гюйгенса-Адамара, то уравнение (10) полностью соответствует его обобщенной формулировке [11]: последовательное решение задачи Коши в промежутках $[t_0, t_1]$, $[t_1, t_2]$, . . . , $[t_{m-1}, t_m]$ эквивалентно решению задачи Коши в промежутке $[t_0, t_m]$. В соответствии с такой формулировкой расщепленная система будет состоять из уравнений с операторами перехода, которые имеют следующие свойства:

$$S_\tau(t + \tau, t) = S_N\left(t + \tau, t + \frac{N-1}{N}\tau\right) \times S_{N-1}\left(t + \frac{N-1}{N}\tau, t + \frac{N-2}{N}\tau\right) \times \dots \times S_1\left(t + \frac{\tau}{N}, t\right), \quad (11)$$

где N – количество разложений, которое обычно определяется размерностью выходной системы уравнений.

Если выходная система уравнений имеет вид:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = P_{\tau} V + f_{\tau}, \quad (12)$$

а продолженная система уравнений записывается как:

$${}^l \frac{\partial V}{\partial t} = {}^l P_{\tau} {}^l V + {}^l f_{\tau}, \quad (13)$$

где l – индекс разложения, то справедливо соотношение, аналогичное равенству (13):

$$S_{\tau}^k(t + \tau, t) = S_N^k\left(t + \tau, t + \frac{N-1}{N}\tau\right) \times S_{N-1}^k\left(t + \frac{N-1}{N}\tau, t + \frac{N-2}{N}\tau\right) \times \dots \times S_1^k\left(t + \frac{\tau}{N}, t\right). \quad (14)$$

Под термином продолженной системы (13), которая фактически представляет собой расщепленную систему, подразумевается система уравнений, записанная с помощью оператора, полученного дифференцированием исходных уравнений.

С точки зрения дальнейшего применения в информационных технологиях уравнение (14) подразумевает, что факторизация продленной системы представляет собой продолжение факторизованной, а операции продолжения и факторизации являются перестановочными, т.е. продленной системе соответствует продолжена задача.

Для дальнейшего использования метода расщепления в информационных технологиях при построении образов визуализации распределения гидромеханических параметров важное значение имеет теорема сходимости. Ее формулировка, следующая: если факторизованная исходная и первая продолжена системы корректные, и решение исходной системы достаточно гладкое, то оно единственное и к нему сходится решение факторизованной системы [11–12]. Рассмотрение теоремы в применении к построению визуализации распределения характерного гидромеханического параметра или при выделении в пространстве характерной изолинии показывает, что:

- если во время визуализации входные потоковые данные получены путем устойчивого численного моделирования и соответствуют корректному решению системы дифференциальных уравнений движения, то образ визуализации будет однозначным и корректным;

- совпадение картины визуализации с реальным образом гидродинамического процесса будет соответствовать погрешности математического блока, задействовано в информационной технологии.

Все записанные выше системы уравнений движения (2)–(6) не могут быть решены в силу своей переопределенности. Для трех составляющих скорости и давления везде присутствует только три уравнения. По этой причине в каждую из этих систем необходимо ввести дополнительное замыкающее четвертое уравнение. Чаще всего в литературе по гидродинамике предлагается использовать уравнение неразрывности

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (15)$$

В силу своей простоты и обоснованной физической трактовки такой способ замыкания уравнений является корректным.

С точки зрения информационных технологий использование уравнения (15) является затруднительным. Его нельзя использовать в методе расщепления, поскольку в этом случае будет нарушаться основное условие – требование к неразрывности потока. По этой причине для создания программного комплекса перспективным является использование трансформированного уравнения для давления. Его можно записать в форме, называемой уравнением типа Пуассона, как:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 2\rho \times \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial z} \right). \quad (16)$$

При построении изолиний, характеризующих гидродинамические процессы, целесообразным является использование аналитических выражений или констант, описывающих эти свойства. В создаваемых программных комплексах они будут формировать необходимые информационные потоки, и в последующем их использование будет выполняться с наименьшими затратами вычислительных мощностей. Примером такого подхода является видоизмененное уравнение Менделеева-Клапейрона для описания плотностной стратификации воздушного потока в зависимости от распределения температуры по его высоте:

$$\rho = \frac{P_B}{R_B T} + \frac{\psi P_{H.п}}{R_H T}, \quad (17)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; P_B – парциальное давление сухого воздуха, Па; $P_{H.п}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па; ψ – относительная влажность, %; R_B – газовая постоянная для сухого воздуха, Дж/(кгК); R_H – газовая постоянная для пара, Дж/(кгК); T – температура, К.

Для повышения качества визуализации гидродинамических течений был предложен подход, который базируется на построении линий, соответствующих равным значениям градиентов интересующих исследователя гидродинамических параметров. Главным требованием в случае построения образа визуализации является условие, что в относительных единицах величина постоянства градиента во всех точках изолинии должна в пределах задаваемой погрешности удовлетворяться полностью. Аппроксимация допустима в случае обработки значений, соответствующих минимум пяти точкам по каждому изометрическому направлению. Во время численных расчетов это может соответствовать второму или третьему порядку точности расчета и отображения интересующих величин.

Выводы

1. С точки зрения разработки различных программных продуктов для последующего использования информационных технологий в различных гидродинамических рабочих процессах очень важным является универсализация подхода к выбору математического аппарата. Уровень сложности уравнений определяет в первую очередь затраты и ресурсы машинного времени, а также влияет на качество анализа получаемых в результате образов визуализации или распределений характерных параметров течений.

2. Математический аппарат, который может быть использован в информационных технологиях для визуализации гидродинамических процессов, может быть условно разделен на четыре уровня. Различие между этими уровнями заключается в качестве воспроизводства образов визуализации реальных течений.

3. При проведении последующих разработок необходимо уделить особое внимание разработке высокоточных алгоритмов, которые используются при построении поля течения потока посредством построения характерных изолиний.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков К. Н. (2014). Методы визуализации вихревых течений в вычислительной газовой динамике и их применение при решении прикладных задач. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 3 (91), 1-10.
2. Знаменская И. А. (2013). Взаимодействие численной и экспериментальной визуализации потоков. *Научная визуализация*. 5 (3), 1-16.
3. Ладыженская О. А. (1970). Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. Москва: Наука.
4. Bondarev A. E. & Galaktionov V. A. (2013). Parametric Optimizing Analysis of Unsteady Structures and Visualization of Multidimensional Data. *International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing*. 4 (1).
5. Кутин В. А. (2011). Система визуализации программного комплекса FLOWVISION. *Научная визуализация*. 3 (1), 1–18.
6. Афендииков А. Л., Ханхасаева Я. В., Луску А. Е., Меньшов И. С., Меркулов К. Д. (2016). Computation and visualization of flows past bodies in mutual motion. *Scientific Visualization*. 8 (4), 128-138.
7. Лодянский Л. Г. (1973). Механика жидкости и газа. Москва : Наука.
8. Ландау Л. Д., Липшиц Е. М. (1988). Гидродинамика. Москва : Наука.
9. Лаврентев М. А., Шабат Б. В. (1973). Проблемы гидродинамики и их математические модели. Москва: Наука.
10. Пейре Р., Тейлор Д. (1986). Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Ленинград: Гидрометеиздат.
11. Яненко Н. Н. (1967). Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение.
12. Ковеня В. М., Яненко Н. Н. (1981). Метод расщепления в задачах газовой динамики. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение.

REFERENCES

1. Volkov, K. N. (2014). Metody vizualizacii vixrevykh techenij v vychislitelnoj gazovoj dinamike i ix primenenie pri reshenii prikladnyx zadach. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 3 (91), 1–10.
2. Znamenskaya, I. A. (2013). Vzaimodejstvie chislennoj i eksperimentalnoj vizualizacii potokov. *Nauchnaya vizualizaciya*, 5 (3), 1–16.
3. Ladyzhenskaya, O. A. (1970). *Matematicheskie voprosy dinamiki vyazkoj neszhimaemoj zhidkosti*. Moskva: Nauka.
4. Bondarev, A. E. & Galaktionov, V. A. (2013). Parametric Optimizing Analysis of Unsteady Structures and Visualization of Multidimensional Data. *International Journal of Modeling, Simulation and Scientific Computing*, 4 (1).
5. Kutin, V. A. (2011). Sistema vizualizacii programmnoho kompleksa FLOWVISION. *Nauchnaya vizualizaciya*. 3 (1), 1–18.
6. Afendikov, A. L., Khankhasaeva, Ya. V., Lusky, A. E., Menshov, I. S. & Merkulov, K. D. (2016). Computation and visualization of flows past bodies in mutual motion. *Scientific Visualization*, 8(4), 128–138.
7. Lojcyanskij, L. G. (1973). *Mexanika zhidkosti i gaza*. Moskva : Nauka.
8. Landau, L. D. & Lifshic, E. M. (1988). *Gidrodinamika*. Moskva : Nauka.
9. Lavrentev, M. A. & Shabat, B. V. (1973). *Problemy gidrodinamiki i ix matematicheskie modeli*. Moskva: Nauka.
10. Pejre, R. & Tejlor, D. (1986). *Vychislitelnye metody v zadachax mexaniki zhidkosti*. Leningrad: Gidrometeoizdat.

11. Yanenko, N. N. (1967). *Metod drobnix shagov resheniya mnogomernyx zadach matematicheskoy fiziki*. Novosibirsk: Nauka. Sib. Otdelenie.
12. Kovenya, V. M. & Yanenko, N. N. (1981). *Metod rasshhepleniya v zadachax gazovoy dinamiki*. Novosibirsk: Nauka. Sib. Otdelenie.

Малахова Д. О. КЛАСИФІКАЦІЯ РІВНЯНЬ ГІДРОДИНАМІКИ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ПРИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ТЕЧІЙ

У статті наведено опис розробленої методики вибору рівня складності основних рівнянь гідродинаміки у програмних продуктах, які розробляються для використання в інформаційних технологіях. Показано, за рахунок реалізації яких процесів обробки під час побудови образів візуалізації, числові дані можуть з різним рівнем складності відображати процес, який моделюється. Сформульовано основні критерії, на підставі яких можливе отримання інформації для подальшого аналізу конкретних технологічних процесів за участю потоку рідини або газу, що рухається. Показано, яким чином можливо контролювати якість побудови образу візуалізації на основі поточкових даних по відношенню до реальної картини течії рідини або газу.

Ключові слова: інформаційні технології, база даних, система рівнянь руху, образ візуалізації, поле швидкості, градієнт зміни параметра.

Malakhova D. A. CLASSIFICATION OF HYDRODYNAMIC EQUATIONS FOR USE IN INFORMATION TECHNOLOGIES UNDER FLOW VISUALIZATION

The article describes the developed methodology for choosing the level of complexity of the basic equations of hydrodynamics in software products that are developed for use in information technology. It is shown due to the implementation of which processing processes during the construction of visualization images, numerical data can reflect the simulated process with various levels of complexity. The main criteria are formulated, on the basis of which it is possible to obtain information for the subsequent analysis of specific technological processes with the participation of a moving stream of liquid or gas. It is shown how it is possible to control the quality of constructing a visualization image based on streaming data in relation to the real picture of the flow of liquid or gas. From the point of view of developing various software products for the subsequent use of information technology in various hydrodynamic work processes, it is very important to universalize the approach to choosing a mathematical apparatus. The level of complexity of the equations primarily determines the costs and resources of machine time, and also affects the quality of the analysis obtained as a result of visualization patterns or distributions of characteristic flow parameters.

From the point of view of developing various software products for the subsequent use of information technology in various hydrodynamic work processes, it is very important to universalize the approach to choosing a mathematical apparatus. The level of complexity of the equations primarily determines the costs and resources of machine time, and also affects the quality of the analysis obtained as a result of visualization patterns or distributions of characteristic flow parameters.

The mathematical apparatus, which can be used in information technology to visualize hydrodynamic processes, can be conditionally divided into four levels. The difference between these levels is in the quality of reproduction of visualization patterns of real flows.

In subsequent developments, it is necessary to pay special attention to the development of high-precision algorithms that are used to construct the flow field by constructing characteristic isolines.

Keywords: information technology, database, system of equations of motion, image of visualization, velocity field, parameter change gradient.

© Малахова Д. О.

Статтю прийнято
до редакції 24.09.19