

УДК 532.529

А.В. Ялозо

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ИНЖЕНЕРНЫХ ГИДРОСИСТЕМАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики –
Российский федеральный ядерный центр

Представлен гибридный метод моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах. Методика моделирования одномерных течений сжимаемых и несжимаемых сред основана на использовании законов сохранения массы и импульса и эмпирических характеристик элементов. Моделирование течений в трехмерном приближении основано на использовании алгоритма SIMPLE. Реализован метод проведения связанных 1D-3D расчетов в программном комплексе «FlowDesigner» и модуле расчета гидродинамических течений ПП ЛОГОС. Приведены результаты верификации предложенного метода.

Ключевые слова: связанное моделирование, инженерные гидросистемы, трубопроводы, гидравлический расчет, FlowDesigner, ПП ЛОГОС.

Введение

В области математического моделирования инженерных гидросистем можно выделить два основных подхода. Первый из них – одномерное (1D) моделирование гидросистем различного назначения, основанное на использовании методов теории гидравлических цепей (ТГЦ) [1] и оперирующее интегральными балансами потоков. Определение потерь удельной энергии (гидравлических потерь) на участках гидравлических систем при таком подходе основано на использовании эмпирических формул. Как правило, такие системы представляют собой сеть разветвленных трубопроводов сложной структуры и достаточной протяженности. Численные методы моделирования таких задач базируются на различных способах решения систем нелинейных алгебраических уравнений, основанных на законах сохранения массового баланса и импульса [1-5]. Второй подход к математическому моделированию инженерных гидросистем – трехмерное (3D) моделирование гидродинамических течений в объектах сложной геометрической конфигурации. К данным объектам относятся такие промышленные изделия как ракеты, реакторы, турбины, корабельные установки и др. Математическое моделирование гидродинамических течений в этих изделиях осуществляется с целью детальной оценки технических характеристик [6-8], учитывающих взаимовлияние различных физических процессов и позволяющих максимально точно воспроизвести трехмерную картину течения.

Однако существуют задачи, решение которых с применением только одного из описанных подходов невозможно: например, гидросистемы, содержащие элементы с неизвестными эмпирическими характеристиками, либо участки, на которых важно получить детализированные по пространству и времени результаты. Подобные задачи часто встречаются при моделировании гидродинамических течений в автомобильной, авиационной и энергетической промышленности. Во многих случаях они требуют проведения значительного количества расчетов с целью многокритериальной многодисциплинарной оптимизации разрабатываемых образцов техники. Оптимальным подходом для такого класса задач является проведение связанных расчетов, сочетающих в себе трехмерное численное моделирование и полуэмпирическую оценку с использованием ТГЦ [1]. В этом случае задача целиком решается в одномерном приближении с использованием ТГЦ; выделяются один или несколько участков,

гидродинамические характеристики которых оцениваются с помощью численного решения уравнений Навье-Стокса в трехмерной постановке. Данный подход позволяет получить распределение интегральных характеристик по всей системе при относительно небольших вычислительных затратах. При этом на критически важных участках сохраняется возможность получения детализированных по пространству результатов посредством трехмерного математического моделирования. Детальное исследование воздействия гидродинамического потока на отдельные элементы конструкции позволяет определить потенциально проблемные места и заранее принять меры по обеспечению их надежности и оптимальной работоспособности.

Связанное 1D-3D моделирование широко применяется для решения задач в различных областях промышленности. Так, в работах [9, 10] приводятся результаты связанного моделирования отдельных фрагментов системы жидкостного охлаждения легкового автомобиля с целью оптимизации отдельных компонентов. В работах [11, 12] такой подход используется для моделирования кровеносной системы человека с учетом различных патологий. В работе [13] на примере моделирования части системы охлаждения реактивного двигателя показано, что точность итогового результата связанной модели сопоставима с полностью трехмерной постановкой, при этом связанная модель позволила существенно ускорить общее время решения задачи. Однако в большинстве исследований для поведения расчетов используется коммерческое программное обеспечение и, как следствие, недостаточно освещаются численные алгоритмы организации связи.

Настоящая статья посвящена описанию гибридного метода и разработанного на его основе программного комплекса одномерного моделирования инженерных гидросистем с возможностью проведения связанных 1D-3D расчетов.

Основные уравнения и метод расчета

Рассмотрим численный метод моделирования гидродинамических течений в одномерном приближении. Любую инженерную гидросистему можно представить в виде набора соединенных между собой гидравлических элементов. Места сочленения двух и более элементов между собой далее будем называть узлами гидравлической системы.

Прежде всего, сформулируем основные допущения и пределы применимости предлагаемого метода моделирования гидросистем в одномерном приближении. Такие параметры транспортируемой среды, как давление и плотность, изменяются только вдоль течения потока. В пределах одного гидравлического элемента параметры транспортируемого вещества считаются усредненными. В случае необходимости при моделировании протяженных элементов они разделяются на конечное число контрольных объемов по направлению потока. При этом параметры транспортируемого вещества в пределах одного контрольного объема также считаются усредненными, а массовый расход между соседними контрольными объемами вычисляется как скалярная величина. Предполагается, что весь объем всех связанных между собой гидравлических элементов не может быть пустым, а всегда заполнен одинаковым веществом с теми или иными параметрами. В процессе расчета замена одного вещества на другое не предусмотрена. Температура транспортируемого вещества считается постоянной. Представленный метод не учитывает процессы критического течения, гидравлических ударов и распространения акустических волн.

Введем обозначения: Q_i – объемный расход, P_i – полное давление, ρ_i – плотность транспортируемого вещества на каждом из входов / выходов элементов схемы. Основная идея предлагаемого метода состоит в описании каждого конструктивного элемента гидросистемы набором уравнений относительно объемных расходов Q_i и давлений P_i на каждом из его входов / выходов, не зависящих от топологии системы. Количество уравнений, которыми должен быть описан элемент, будет зависеть от количества его входов. Как правило, такие зависимости определяются экспериментально и на основе эмпирических формул. Формулы

для вычисления гидравлических сопротивлений основных видов элементов трубопроводов представлены в [14, 15].

Для каждого узла системы из закона сохранения массы следует, что независимо от типа вещества, перемещающегося по системе, алгебраическая сумма массовых расходов в любом узле сети равна нулю. Поэтому для каждого узла системы будет справедливо равенство (1):

$$\sum_{i=1}^k \rho_i \cdot Q_i = 0, \quad (1)$$

где k – количество элементов, сходящихся в узле.

Очевидно, что для каждого узла также справедливо равенство (2):

$$P_1 = P_2 = \dots = P_k. \quad (2)$$

Для эффективного расчета расходов и давлений в гидравлической системе в отличие от уже существующих подходов предлагается составить общую систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) для Q_i и P_i , содержащую уравнения сохранения для всех узлов системы и уравнения, описывающие все элементов системы (3):

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ P_1 \\ \vdots \\ Q_n \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_{2n} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При этом линейзация уравнений осуществляется методом простых итераций. В итоге решение стационарной задачи потокораспределения в гидросистеме сводится к итерационному решению серии СЛАУ (4):

$$\begin{aligned} Q_i^{(k+1)} &= \alpha_q \cdot Q_i^{(k)} + (1 - \alpha_q) \cdot Q_i^{(k-1)}, & \alpha_q &\in (0, 1), \\ P_i^{(k+1)} &= \alpha_p \cdot P_i^{(k)} + (1 - \alpha_p) \cdot P_i^{(k-1)}, & \alpha_p &\in (0, 1), \end{aligned} \quad (4)$$

где $k = 1, 2, \dots$ – номер итерации, α_q – коэффициент релаксации по расходу, α_p – коэффициент релаксации по давлению.

В случае нестационарной задачи решение на каждом временном шаге также сводится к решению серии СЛАУ (4). За счет использования общей СЛАУ для расходов и давлений потребуются меньшее количество итераций до заданного уровня сходимости, чем при отдельном нахождении расхода и давления. Это важно для систем, содержащих большое количество сложных элементов с существенно нелинейными характеристиками. Вектор решения системы (3) будет содержать искомые значения объемных расходов и давлений всех элементов гидравлической сети. За начальное приближение для Q_i и P_i можно принять произвольные ненулевые значения характерного расхода и давления. При этом для Q_i не требуется выполнения закона сохранения массы (1). Для решения общей СЛАУ используется модифицированный метод Гаусса с выбором главного элемента, позволяющий за конечное число вычислений найти точное решение либо сделать вывод о несовместности СЛАУ. Как показала практика, данный метод обеспечивает достаточно быструю сходимость (в пределах 30 итераций) при моделировании большинства гидросистем, причем количество итераций практически не зависит от размерности задачи и от выбора начального приближения. Оптимальное соотношение по скорости сходимости и устойчивости итерационного процесса позволяют достичь значения параметров $\alpha_q = \alpha_p = 0,7$. При моделировании гидросистем большой размерности, насыщенных элементами с существенно нелинейными характеристиками, для повышения устойчивости итерационного процесса оптимально использовать значения $\alpha_q = \alpha_p = 0,5$. Детальное изложение используемой одномерной методики расчета разветвленной сети трубопроводов представлено в [16, 17].

Получение пространственного распределения характеристик течения основывается на численном решении системы уравнений Навье-Стокса [18], описывающей течение вязкой сжимаемой жидкости. Одним из численных алгоритмов решения уравнений Навье-Стокса является алгоритм SIMPLE [19-22]. Данный алгоритм лежит в основе модуля расчета гидродинамических течений отечественного пакета программ инженерного анализа «ЛОГОС» (далее – ПП ЛОГОС), предназначенного для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [23-25]. ПП ЛОГОС успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач [26, 27], включая распространение гравитационных волн на свободной поверхности (цунами) [28, 29] и промышленные задачи [6].

Предлагаемый гибридный метод моделирования инженерных гидросистем основывается на организации обменов граничными условиями между разномасштабными областями по ходу проведения расчета. В процессе проведения связанного расчета при моделировании трехмерной области в качестве граничных условий будем задавать значение массового расхода G_{in} на входе и значение полного давления P_{out} на выходе, рассчитанные в одномерной области. Из трехмерной в одномерную область будем передавать значение перепада давления $\Delta P = P_{in} - P_{out}$, где $P_{in} = \frac{\int \rho v ds}{|F_{in}|}$ – полное давление, осредненное по сечению трехмерной области. Исходя из данных требований, можно сформулировать следующий алгоритм связи одномерной и трехмерной моделей:

Шаг 1. Начальная инициализация одномерной и трехмерной областей.

Шаг 2. Выполнение одной счетной итерации в одномерной области, получение новых значений G_{in} и P_{out} .

Шаг 3. Передача значений G_{in} и P_{out} из одномерной в трехмерную область, восстановление структуры течения на входной границе трехмерной области.

Шаг 4. Выполнение одной счетной итерации в трехмерной области, получение нового значения $\Delta P = P_{in} - P_{out}$.

Шаг 5. Передача значения ΔP из трехмерной области в одномерную.

Шаг 6. Проверка критериев сходимости задачи и, при необходимости, запуск следующей итерации со второго шага.

Таким образом, предложенный подход к сопряжению разномасштабных областей заключается в организации повторяющихся обменов данными внутри одного временного шага до тех пор, пока не выполнится заданный критерий точности. Представленный метод позволяет выделить неограниченное количество трехмерных областей в задаче. Для ускорения связанного расчета можно выполнять обмен данными не на каждой счетной итерации, а использовать дополнительный критерий проведения обмена данными, например, основываясь на критериях сходимости каждой из расчетных областей.

Программный комплекс «FlowDesigner»

В соответствии с описанным выше методом был разработан и реализован программный комплекс «FlowDesigner», предназначенный для создания в интерактивном режиме модели гидросистемы из набора конструктивных элементов и математического моделирования ее работы. В текущей версии заложен основной необходимый инструментарий для создания структурной схемы системы разветвленных трубопроводов, задания начальных данных составляющих ее конструктивных элементов и проведения расчета. Предусмотрена возможность экспорта полученных результатов в графическом и табличном виде, представления любых расчетных величин в виде графиков. По составу конструктивных элементов «FlowDesigner» полностью адаптирован для моделирования работы топливных систем маневренных самолетов.

Программный комплекс «FlowDesigner» написан на языке программирования C++ в соответствии с основными принципами объектно-ориентированного и структурного программирования и представляет графическое приложение, состоящее из множества классов. Основой приложения послужила кроссплатформенная библиотека QT [30]. QT позволяет запускать написанное с его помощью программное обеспечение в большинстве современных операционных систем путем простой компиляции программы для каждой операционной системы без изменения исходного кода. Библиотека QT включает в себя все основные классы, которые могут потребоваться при разработке прикладного программного обеспечения, начиная от элементов графического интерфейса и заканчивая классами для работы с сетью, базами данных и XML. QT является полностью объектно-ориентированной, легко расширяемой и поддерживающей технику компонентного программирования.

Главное окно программного комплекса «FlowDesigner», показанное на рис. 1, представляет собой многодокументный интерфейс (MDI), в котором каждой отдельной проектируемой схеме соответствует своя собственная вкладка. Одновременно допускается редактирование и расчет неограниченного числа расчетных схем. Динамическая система хранения позволяет хранить в памяти неограниченное число элементов, что позволяет не накладывать ограничения на схему по количеству содержащихся в ней элементов. Счетный модуль комплекса адаптирован для использования на многопроцессорных ЭВМ.

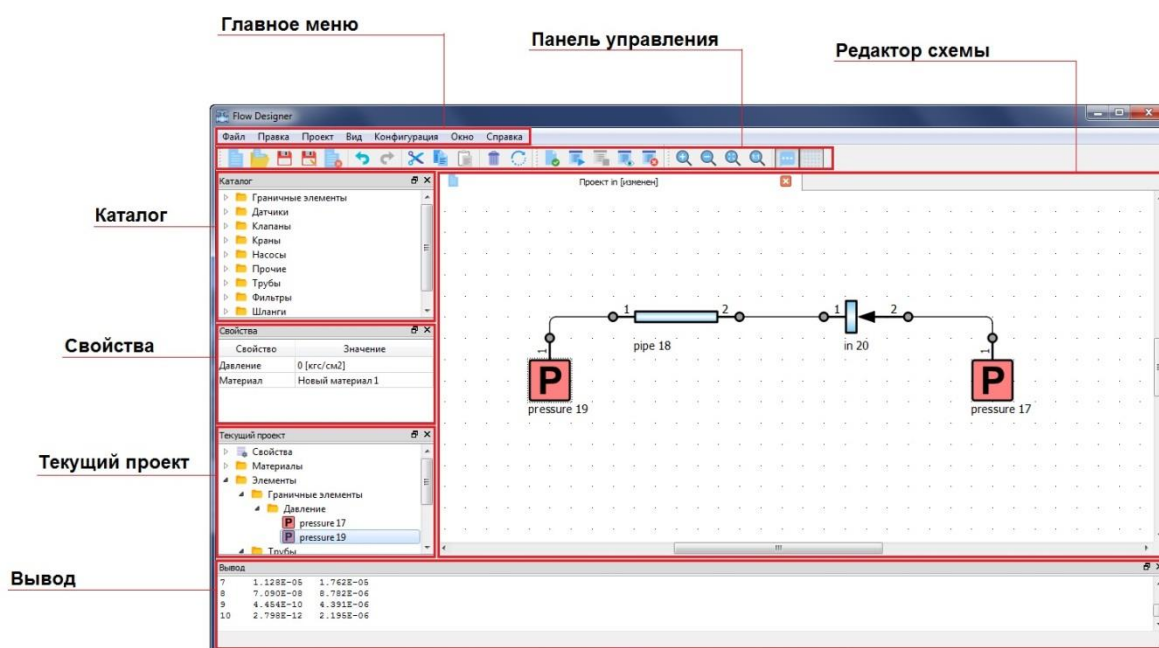


Рис. 1. Интерфейс программного комплекса «FlowDesigner»

Проектирование схемы происходит путем добавления требуемых элементов из «Каталога» (рис. 1), содержащего набор элементов, непосредственно в «Редактор схемы» и соединения элементов между собой. Параметры каждого элемента задаются во вкладке «Свойства». Древовидная структура и общие параметры создаваемой схемы доступны в окне «Текущий проект». Запуск процедуры расчета построенной схемы выполняется из «Главного меню» «FlowDesigner» либо из «Панели управления», дублирующей основные операции работы со схемой. Вся информация о ходе выполнения расчета отображается в окне «Вывод» (рис. 1). После выполнения расчета полученные результаты отображаются непосредственно в «Редакторе схемы». Перед выполнением расчета проводится автоматический анализ корректности построенной схемы. Выполняется проверка на наличие несоединенных гидравлических выходов, а также незадаваемых значений обязательных параметров элементов. Завершив расчет, программа автоматически переходит в режим просмотра результатов.

На рис. 2 показана схема в режиме обработки результатов. Справа показана палитра расхода Q , стрелками на схеме показано направление потока.

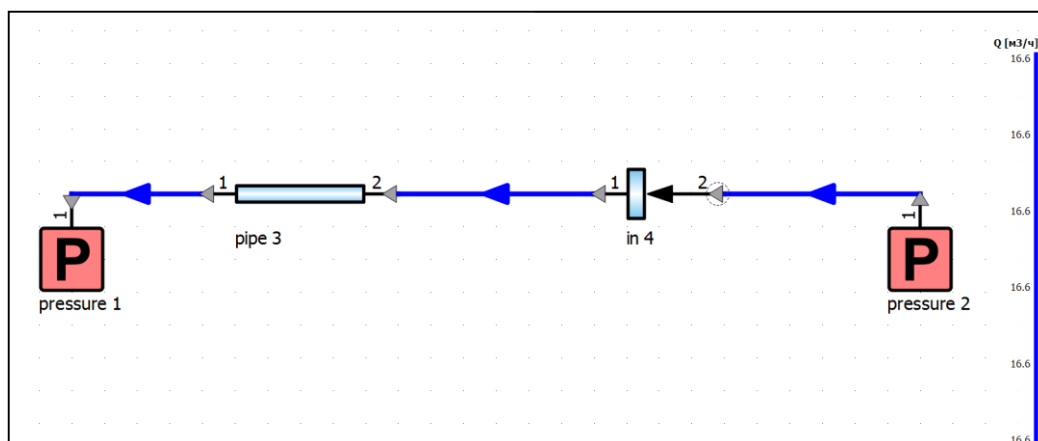


Рис. 2. Просмотр результатов расчета

В случае необходимости все полученные результаты могут быть экспортированы в табличном формате. Кроме этого, возможно сохранение макета схемы, включая полученные направления течений и палитру полученных результатов в графическом файле. Для облегчения работы конечного пользователя разработанный программный комплекс включает в себя интерактивную справочную систему. В ней подробно описываются основные этапы работы с программой, а также приведены математические модели всех конструктивных элементов, доступных в данном программном комплексе.

Течение в прямой трубе круглого поперечного сечения

В рамках программного комплекса «FlowDesigner» в соответствии с изложенным методом была реализована возможность проведения связанных расчетов с ПП ЛОГОС. Для верификации предложенного подхода к сопряжению разномасштабных областей рассмотрим задачу течения жидкости по прямой трубе круглого сечения. На трубе, имеющей внутренний диаметр 0,02 м и длину 0,2 м, задается перепад давления 5,6 кПа. Плотность перетекающей по трубе жидкости составляет 1000 кг/м^3 , динамическая вязкость – $\mu = 0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Требуется определить распределение массового расхода жидкости через трубу с течением времени. Будем решать данную задачу в двух постановках: с использованием полностью трехмерной модели и в связанной постановке. Для моделирования задачи в трехмерной постановке была построена блочно-структурированная сетка, состоящая из 16 500 ячеек (рис. 3).

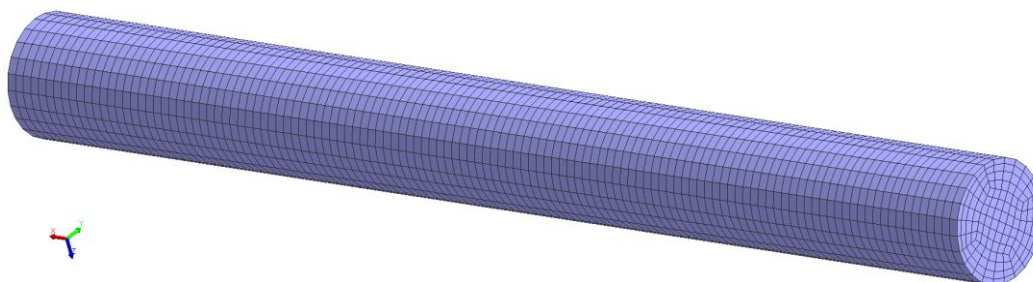


Рис. 3. Сеточная модель трубы круглого сечения

Для связанной постановки половину трубы длиной 0,1 м будем моделировать в трехмерном приближении, а оставшуюся часть – с использованием одномерной методики. Для ламинарного течения ньютоновской жидкости в прямой трубе круглого поперечного сечения с учетом прилипания потока на стенках есть известное аналитическое решение [31] (5):

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L}, \quad (5)$$

где Q – объемный расход, м³/с; R – радиус трубы, м; ΔP – перепад давления на концах трубы, Па; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; L – длина трубы, м.

Используя (5) можно определить аналитические значения установившегося объемного расхода в трубе.

На рис. 4 представлено векторное поле скорости для полностью трехмерной и связанной постановок. Как видно из рисунка, поля скоростей в полностью трехмерной и связанной постановке совпадают. Это говорит о корректности предложенного алгоритма по сопряжению разномасштабных областей. Погрешность результатов численного моделирования относительно аналитического решения, вычисленного по формуле (5), не превышает 0,5 %.

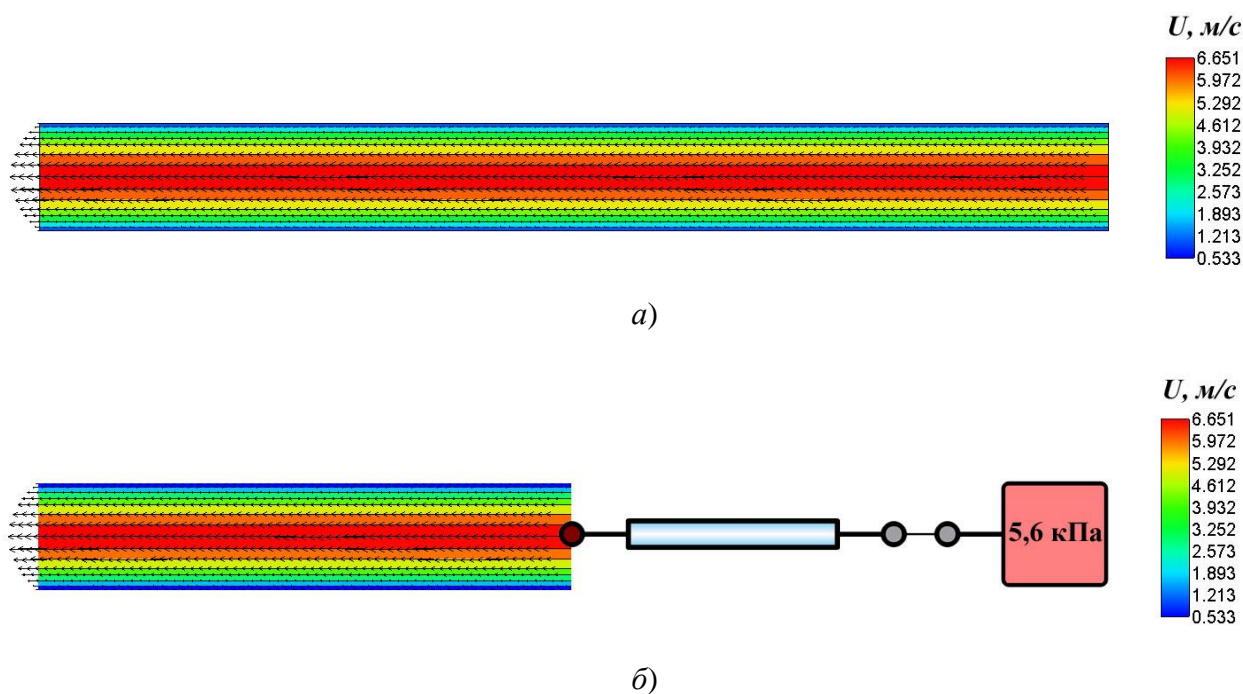


Рис. 4. Векторное поле скорости:
а – 3D модель; б – 1D-3D модель

На рис. 5 представлено распределение давления. Перепад давления по всей длине трубы совпадает для полностью трехмерной 3D или связанной 1D-3D постановок, при этом давление в области стыковки соответствует половине перепада давления для всей трубы.

Из представленных результатов можно сделать вывод, что полностью трехмерная и связанная постановки дают практически одинаковые результаты. Разница в вычислениях не превышает 0,2 %. Это подтверждает корректность предложенного подхода по организации связи разномасштабных областей.

Заключение

В статье рассмотрен гибридный метод моделирования гидродинамических течений в инженерных гидросистемах. Приведено краткое описание метода моделирования работы систем разветвленных трубопроводов в одномерном приближении, реализованного в программном комплексе «FlowDesigner». Моделирование течений в трехмерном приближении основано на использовании алгоритма SIMPLE, реализованного в модуле расчета гидродинамических течений ПП ЛОГОС. Реализован метод проведения связанных 1D-3D расчетов в программном комплексе «FlowDesigner» и модуле расчета гидродинамических течений ПП ЛОГОС. Приведены результаты верификации предложенного метода.

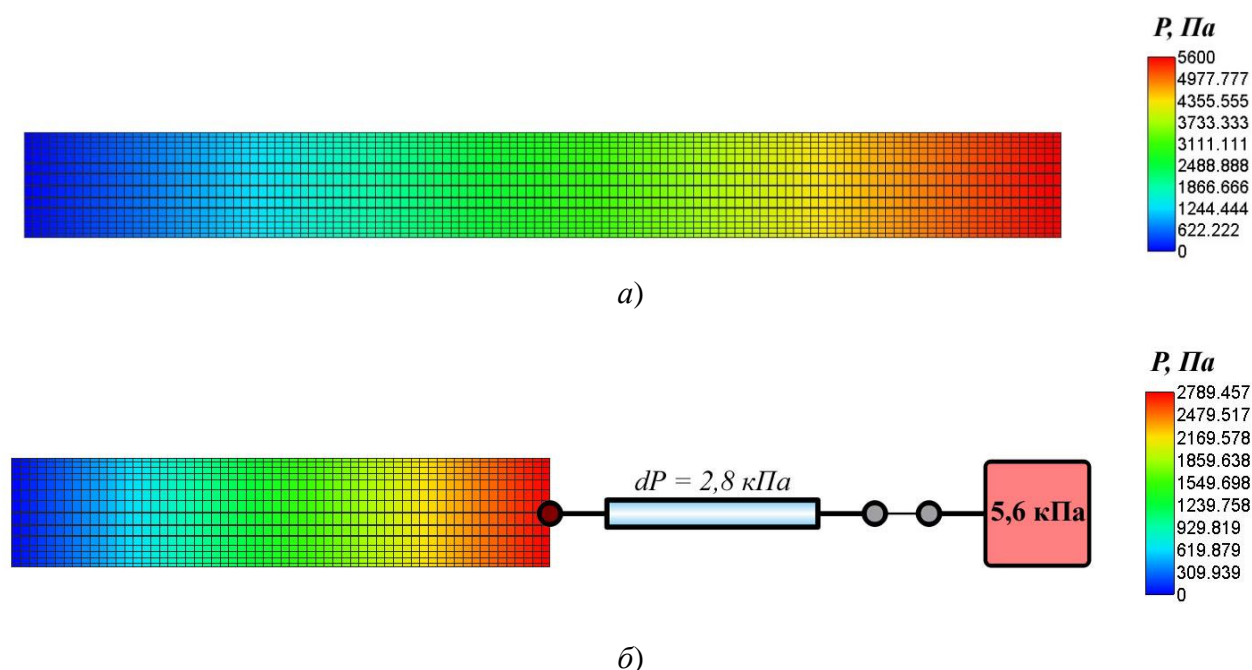


Рис. 5. Распределение давления:

a – 3D модель; *б* – 1D-3D модель

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9, государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5, а также при финансовой поддержке РФФИ - 17-05-00067.

Библиографический список

1. **Меренков, А.П.** Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 279 с.
2. **Todini, E.** A gradient method for the solution of looped pipe networks / E. Todini, S. Pilati // Comput. Appl. Water Supply. – 1988. – №. 1. – P. 1-20.
3. **Coelho, B.** Efficiency achievement in water supply systems – A review / B. Coelho, A. Andrade-Campos // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 30. – P. 59-84.
4. **Ateş S.** Hydraulic modelling of control devices in loop equations of water / S. Ateş // Flow Measurement and Instrumentation. – 2017. – V. 53. – P. 243-260.
5. **Ormsbee, L.E.** The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age / L.E. Ormsbee // 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. Cincinnati, Ohio, USA, 2006.

6. **Betelin, V.B.** Mathematical simulation of hydrogen–oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code / V.B. Betelin, R.M. Shagaliev, S.V. Aksenov, I.M. Belyakov, Y.N. Deryugin, A.S. Kozelkov, D.A. Korchazhkin, V.F. Nikitin, A.V. Sarazov, D.K. Zelenskiy // *Acta Astronautica*. – 2014. – V. 96. – P. 53-64.
7. **Сафронов, А.В.** Результаты валидации многофункционального пакета программ ЛОГОС при решении задач аэрогазодинамики старта и полета ракет-носителей / А.В. Сафронов, Ю.Н. Дерюгин, Р.Н. Жучков, Д.К. Зеленский, А.В. Саразов, А.С. Козелков, Н.Ф. Кудимов, Ю.М. Липницкий, А.В. Панасенко // *Математическое моделирование*. – 2014. – Т. 26. – № 9. – С. 83-95.
8. **Козелков, А.С.** Расчетные исследования аэродинамических характеристик сверхзвукового самолета на крейсерских режимах полета / А.С. Козелков, А.В. Корнев, Д.Ю. Стрелец, И.А. Танненберг, А.А. Останко // *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*. – 2017. – № 6. – С. 17-21.
9. **Lu, P.** The simulation methods based on 1D/3D collaborative computing for the vehicle integrated thermal management / P. Lu, Q. Gao, Y. Wang // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 104. – P. 42-53.
10. **Pang, S.C.** A review on air flow and coolant flow circuit in vehicles' cooling system // *International Journal of Heat and Mass Transfer* / S.C. Pang, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, M.A. Hazrat. – 2012. – № 55. – P. 6295-6306.
11. **Formaggia, L.** On the coupling of 3D and 1D Navier-Stokes equations for flow problems in compliant vessels / L. Formaggia, J.F. Gerbeau, F. Nobile, A. Quarteroni // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 2001. – V. 191. – P. 561-582.
12. **Dobroserdova, T.K.** A finite element solver and energy stable coupling for 3D and 1D fluid models / T.K. Dobroserdova, M.A. Olshanskii // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – 2013. – V. 259. – P. 166-176.
13. **Peng, W.** A novel multi-fidelity coupled simulation method for flow systems / W. Peng, Z. Yun, Z. Zhongping, Q. Lei, Z. Zhixiang // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2013. – V. 26(4). – P. 868-875.
14. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
15. **Селезнев, В.Е.** Математическое моделирование трубопроводных сетей и каналов. Методы, модели и алгоритмы / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 695 с.
16. **Ялозо, А.В.** Математическое моделирование работы топливной системы самолета / А.В. Ялозо, А.С. Козелков, Д.Ю. Стрелец, А.В. Корнев, И.Л. Матерова, Е.А. Левченко, И.Н. Лапенков // *Общероссийский научно-технический журнал «Полет»*. – 2018. – № 6. – С. 12-24.
17. **Ялозо, А.В.** Моделирование систем разветвленных трубопроводов / А.В. Ялозо, А.С. Козелков, В.В. Курулин, И.Л. Матерова, А.В. Корнев, Д.Ю. Стрелец // *Математическое Моделирование*. – 2018. – Т. 30. – № 10. – С. 123-138.
18. **Ландау, Л.Д.** Гидродинамика / Л.Д. Ландау, В.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2001, – 732 с.
19. **Флетчер, К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. – М.: Мир, Т. 1, 2, 1991. – 1056 с.
20. **Волков, К.Н.** Разностные схемы в задачах газовой динамики на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, А.С. Козелков, В.Н. Емельянов, И.В. Тетерина. – М.: Физматлит, 2014. – 416 с.
21. **Козелков, А.С.** Полностью неявный метод решения уравнений Навье-Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью / А.С. Козелков, Д.П. Мелешкина, А.А. Куркин, Н.В. Тарасова, С.В. Лашкин, В.В. Курулин // *Вычислительные технологии*. – 2016. – Т. 21. – № 5, – С. 54-76.
22. **Лашкин, С.В.** Моделирование течений вязкой несжимаемой жидкости разделенным и совмещенным алгоритмом типа SIMPLE / С.В. Лашкин, А.С. Козелков, Д.П. Мелешкина, А.В. Ялозо, Н.В. Тарасова // *Математическое моделирование*. – 2016. – Т. 28. – № 6. – С. 64-76.
23. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, В.В. Курулин, С.В. Лашкин, Р.М. Шагалиев, А.В. Ялозо // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2016. – Т. 56. – № 8. – С. 1524-1535.
24. **Волков, К.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, В.Н. Емельянов, А.Г. Карпенко, А.С. Козелков, И.В. Тетерина. – М.: Физматлит, 2013. – 536 с.

25. **Лашкин, С.В.** Исследование эффективности параллельной реализации алгоритма SIMPLE на многопроцессорных ЭВМ / С.В. Лашкин, А.С. Козелков, А.В. Ялозо, В.Ю. Герасимов, Д.К. Зеленский // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9. – № 3. – С. 298-315.
26. **Козелков, А.С.** Исследование применения RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля / А.С. Козелков, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина, А.А. Куркин, М.А. Легчанов, Ю.А. Циберева // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 4. – С. 44-58.
27. **Козелков, А.С.** Зонный RANS–LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений / А.С. Козелков, А.А. Куркин, О.Л. Крутякова, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 5. – С. 24-33.
28. **Kozelkov, A.S.** Landslide-type tsunami modelling based on the Navier-Stokes Equations / A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin, E.N. Pelinovsky, E.S. Tyatyushkina, V.V. Kurulin, N.V. Tarasova // Science of Tsunami Hazards. – 2016. – V. 35. – №. 3. – P. 106-144.
29. **Kozelkov, A.S.** Numerical modeling of the 2013 meteorite entry in Lake Chebarkul, Russia / A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin, E.N. Pelinovsky, V.V. Kurulin, E.S. Tyatyushkina // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2017. – V. 17. – P. 671-683.
30. **Шлее, М.** Qt 5.3 Профессиональное программирование на C++ / М. Шлее. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 928 с.
31. **Уилкинсон, У.И.** Неньютоновские жидкости / У.И. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

*Дата поступления
в редакцию: 29.07.2019*

A.V. Yalozo

A HYBRID MATHEMATICAL SIMULATION METHOD FOR HYDRODYNAMIC FLOWS IN ENGINEERING HYDRAULIC SYSTEMS

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
All-Russian Research Institute of Experimental Physics – Russian Federal Nuclear Center

Purpose: The paper presents a hybrid method to simulate hydrodynamic flows in engineering hydraulic systems.

Design/methodology/approach: The simulation technique for one-dimensional compressible and incompressible fluid flows is based on the use of the mass and momentum conservation laws, and empirical characteristics of components. The simulation of flows in the three-dimensional approximation is based on the use of the SIMPLE algorithm.

Results: A method of performing coupled 1D-3D simulations has been implemented in the FlowDesigner software complex and in the CFD module of the LOGOS software package. Developed method's verification results are presented.

Area of applicability: The obtained results may be useful for the simulation of hydrodynamic flows in engineering hydraulic systems.

Keywords: coupled simulation, engineering hydraulic systems, hydraulic computation, FlowDesigner, LOGOS SP.