

На рис. 13 справа показан фрагмент полученной сетки. Видно, что внутренние ячейки являются телами Вороного. Полученная сетка хорошо описывает границу области и линии ее излома.

В рамках данной работы были разработаны и реализованы алгоритмы построения трехмерных сеток на основе поверхностной сетки для методики ТИМ. С их помощью появилась возможность построения сеток в сложных трехмерных геометриях. В качестве перспектив развития можно рассмотреть вопрос улучшения качества сетки на основе диаграммы Вороного на границах, совместное применение обоих методов при построении сеток и распараллеливание этих алгоритмов.

Литература

1. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005, № 3. С. 37–52.
2. Вороной Г. Ф. Собрание сочинений. Т. 2. – Киев: Изд-во АН УССР, 1952.
3. Шмелева А. К., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Шурыгин А. В. Алгоритмы построения неструктурированных сеток с использованием быстрого поиска геометрической близости точек для методики ТИМ // X научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: сб. тез. Саров, 1–3 ноября 2011. С. 195.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ

А. В. Ялозо, И. Л. Матерова, В. В. Курулин, А. С. Козелков, В. Ю. Герасимов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

По мере того, как работа самолетов становится эффективнее, надежнее и безопаснее, их конструкция усложняется. Важную роль при разработке и совершенствовании систем самолета играет их экспериментальная отработка. Как правило, проведение экспериментов требует значительных денежных затрат, а в некоторых случаях испытания невозможны. Применение компьютерных технологий для моделирования работы систем в тех или иных режимах эксплуатации позволяет сократить количество проводимых экспериментов и тем самым уменьшить затраты.

В докладе «Математическое моделирование работы топливных систем самолетов» описывается разработанная методика, предназначенная для моделирования одномерных изотермических течений несжимаемой жидкости, которая используется для расчета топливных систем самолетов.

Топливная система обеспечивает подачу топлива из баков к двигателям в заданной последовательности на всех режимах работы самолета и при любом его положении в воздухе [1].

В настоящее время расчет работы топливных систем самолета производится с использованием инженерных приближений и математических пакетов программ.

При моделировании полномасштабных систем, трехмерное моделирование позволяет получить максимально точные результаты, но с точки зрения вычислительных ресурсов оно может оказаться невозможным. Оптимальный подход – использование одномерного моделирования для системы в целом, и трехмерного – для детализации результатов на критически важных компонентах.

В настоящее время существует ряд готовых инструментов моделирования одномерных течений в гидравлических системах, например, такие как HOPSAN, Flowmaster, AMESim.

HOPSAN представляет собой пакет для моделирования механики жидкости, разрабатываемый в университете Linköping. Это общий инструмент моделирования ориентирован на моделирование и имитацию работы гидросистем. HOPSAN является свободно распространяемым пакетом программ [2]. В отличие от большинства других инструментов моделирования Hopsan использует распределенные решатели, что означает, что каждый компонент решает свои собственные уравнения. Это имеет несколько преимуществ. В первую очередь, это позволяет разделить модель на более мелкие части, которые могут быть смоделированы параллельно с использованием многоядерных процессоров. Это может значительно сократить время моделирования для больших моделей.

По заявлению авторов, **Flowmaster** является «ведущим одномерным пакетом вычислительной гидродинамики для моделирования и анализа механики жидкости и потоков в трубах и воздуховодах сложных систем». Он включает в себя обширную базу готовых математических моделей различных материалов и компонент, таких как трубы, вентили и компрессоры и т. д. Одномерные расчеты с помощью Flowmaster могут быть связаны с другими инструментами моделирования, такими как Matlab/Simulink и трехмерными CFD комплексами [3].

LMS Imagine.Lab **AMESim** является широко используемой в самолетостроении коммерческой программой. Она включает в себя 29 междисциплинарных библиотек, содержащих 3300 физических моделей. Библиотеки достоверно валидированы и документированы, позволяют решать задачи всех вовлеченных физических дисциплин, включая гидравлику, термогидравлику, пневматику, электронику, механику и системы управления и контроля [4].

Применение вышеперечисленных программных продуктов позволяет значительно сократить время расчета, однако, в большинстве случаев их использование не представляется возможным ввиду уникальности трубопроводной арматуры и специфики работы режимных предприятий. С учетом вышесказанного разработка отечественного специализированного пакета программ, предназначенного для моделирования работы топливных систем самолетов, является весьма актуальной задачей.

Разработанная методика моделирования одномерных течений в топливных системах основана на использовании основных законов сохранения и эмпирических характеристик элементов, входящих в состав схемы: труб, клапанов, насосов и т. д. Нахождение распределения физических величин основано на неявном методе решения с использованием линеаризации уравнений, который сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

Пусть через абстрактный элемент одномерной гидравлической системы течет жидкость. Запишем уравнения Навье–Стокса для жидкостей и газов:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho u_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_j u_i = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij}. \end{cases}$$

Пусть элемент имеет два входа/выхода с площадями поперечных сечений S_1 и S_2 (см. рис. 1), а жидкость несжимаема.

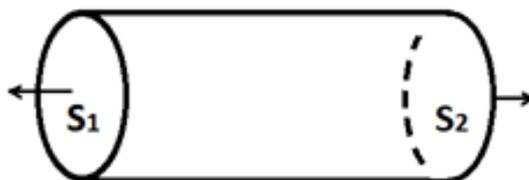


Рис. 1. Абстрактный гидравлический элемент

Тогда, если взять поверхностные интегралы от правых и левых частей (1), с учетом сжимаемости жидкости получим:

$$\begin{cases} \int_{S_1} u_i dS_i + \int_{S_2} u_i dS_i = 0, \\ \int_{S_1} \left(p + \frac{\rho u_j^2}{2} \right) dS_i + \int_{S_2} \left(p + \frac{\rho u_j^2}{2} \right) dS_i = \frac{\lambda}{8} \rho w^2. \end{cases}$$

Тогда для элемента с количеством входов/выходов n будет справедлива СЛАУ:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0, \\ P_{\text{полн1}} - P_{\text{полн2}} = f_1(P_1, P_2, \dots, P_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_n), \\ \dots \\ P_{\text{полн1}} - P_{\text{полн}n} = f_{n-1}(P_1, P_2, \dots, P_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_n). \end{cases}$$

Первое уравнение представляет собой уравнение неразрывности – частный случай выражения закона сохранения вещества. Последующие уравнения устанавливают связь между падением давления на гидравлических коннекторах элемента и расходом через него.

Общая идея разработанной методики моделирования топливных и гидравлических систем заключается в следующем: каждый элемент максимально формализован, о нем известны только уравнения сохранения для неизвестных величин. Нахождение распределения физических величин основано на неявном методе решения с использованием линеаризации уравнений, которая сводит нахождение распределения величин давления и расхода в схеме к решению общей СЛАУ.

На рис. 2 приведен пример простейшей схемы из трех элементов. Красными квадратами показаны граничные элементы «Давление», голубой прямоугольник символизирует элемент «Труба». Серым цветом выделены гидравлические коннекторы элементов. Возле каждого коннектора подписаны расход Q и давление P с соответствующими индексами. Общая СЛАУ для схемы формируется из уравнений для элементов и связей.

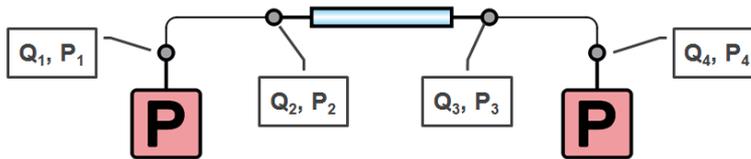


Рис. 2. Схема из трех элементов

На рис. 3 приведена матрица, составленная из общей СЛАУ:

| | P_1 | Q_1 | P_2 | Q_2 | P_3 | Q_3 | P_4 | Q_4 | B |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| 1 | | | | | | | | | P_{def1} |
| | | | 1 | -k | -1 | | | | 0 |
| | | | | 1 | | -1 | | | 0 |
| | | | | | | | 1 | | P_{def2} |
| 1 | | | -1 | | | | | | 0 |
| | | 1 | | -1 | | | | | 0 |
| | | | | | 1 | | -1 | | 0 |
| | | | | | | 1 | | -1 | 0 |

Рис. 3. Матрица, составленная из общей СЛАУ

Итоговая СЛАУ имеет небольшие размеры. Из возникающих трудностей с точки зрения решения СЛАУ можно выделить две основные проблемы:

Матрица СЛАУ может иметь разномасштабные коэффициенты, и для реальных схем СЛАУ плохо обусловлена.

Сложная логика работы элементов может приводить к недоопределенной либо переопределенной СЛАУ.

Для повышения обусловленности СЛАУ применяются:

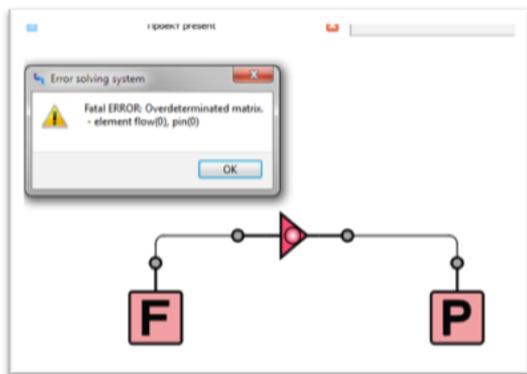
- Приведение величин к безразмерному виду.
- Алгоритм повышения обусловленности за счет отбрасывания неизвестных со слабой связью с другими неизвестными.

Для анализа на неопределенность и переопределенность, решение СЛАУ выполняется методом Гаусса, который дает возможность проанализировать неизвестные на определенность по ходу приведения матрицы СЛАУ к диагональному виду.

На рис. 4 слева приведен простейший случай схемы, которая приводит к созданию переопределенной СЛАУ. Граничный элемент с заданным расходом подключен к обратному клапану, который запирает поток.

На рис. 4 справа приведен простейший случай схемы, которая приводит к созданию недоопределенной схемы. Между двумя закрытыми обратными клапанами имеется изолированный участок, на котором отсутствует связь давления с внешними граничными условиями. При решении такой задачи значение давления на изолированном участке будет установлено начальным значением давления, которое задается пользователем в параметрах расчета схемы.

Выявление переопределенных систем



Выявление изолированных участков

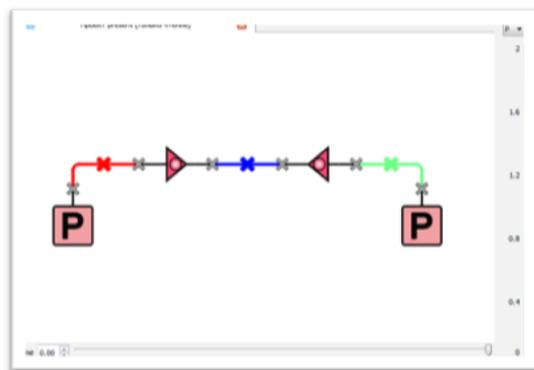


Рис. 4. Решение СЛАУ методом Гаусса с анализом неизвестных на определенность

Разработанная методика моделирования топливных систем и предложенная методика решения были реализованы в программном продукте, основой которого послужила кроссплатформенная библиотека QT. Интерфейс системы поддерживает полный цикл моделирования: проектирование схемы, выполнение расчета и просмотр результатов. Реализовано визуальное отображение результатов расчета и различных состояний элементов, например, иконка клапана меняется в зависимости от его состояния открыт/закрыт. Осуществляется полная поддержка Undo/Redo операций со схемой. Главное преимущество разработанного программного продукта – это возможность проведения связанных одномерных и трехмерных расчетов. В одномерную схему могут быть включены трехмерные элементы, расчет которых проводится с использованием ПП ЛОГОС [5].

Верификация разработанной методики проходила в несколько стадий:

- верификация отдельных элементов;
- верификация небольших составных частей гидравлических подсистем самолета;
- полное моделирование отдельных гидравлических подсистем самолета.

Основой для верификации послужили данные, полученные из ПАО «ОКБ Сухого».

На рис. 5 приведен результат решения верификационной задачи для элемента «Труба тройниковая».

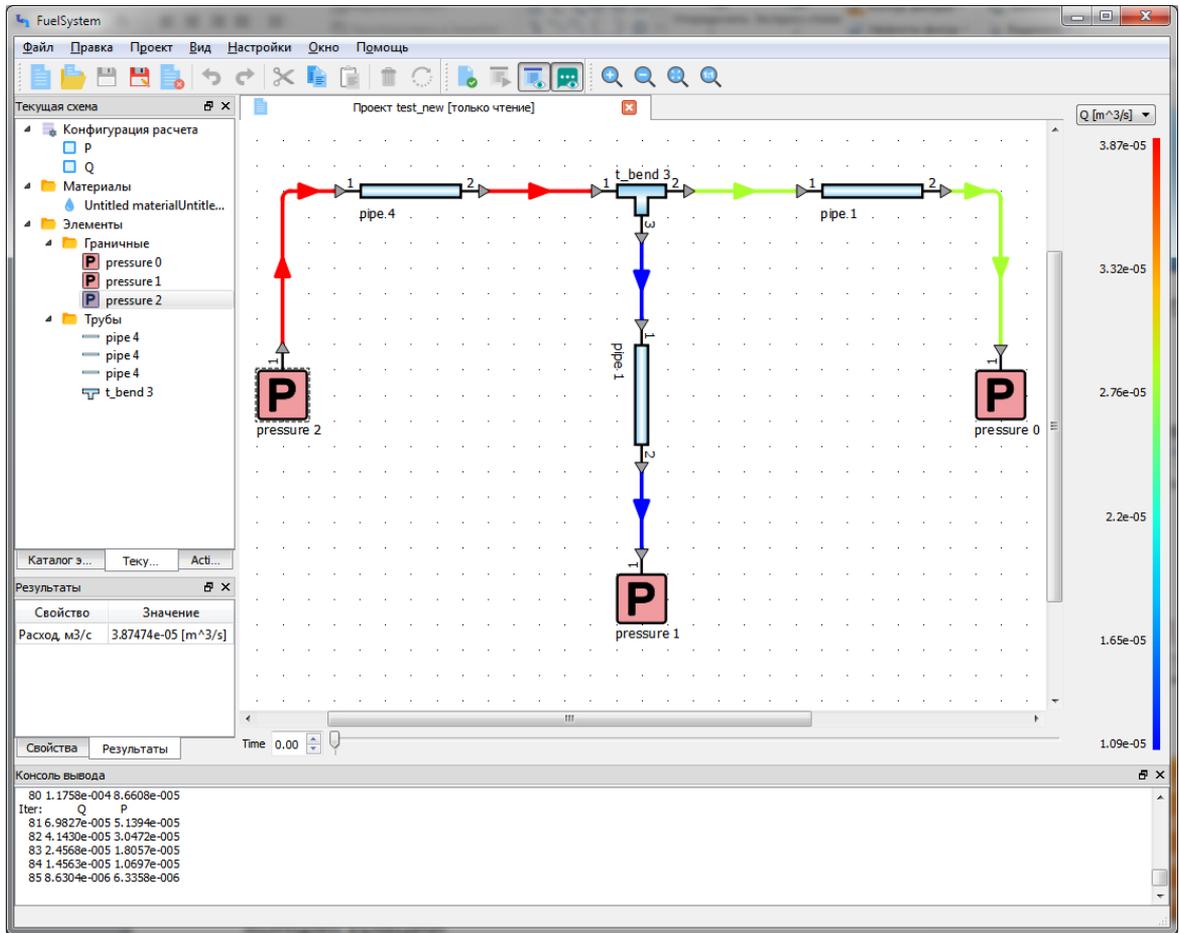


Рис. 5. Результат решения верификационной задачи для элемента «Труба тройниковая»

В качестве примера решенной производственной задачи можно привести стационарный расчет подсистемы приводного топлива маневренного самолета. Был осуществлен расчет одномерного изотермического течения несжимаемой жидкости. Собранная схема содержала в себе около 350 гидравлических элементов. В ее состав входили различные виды насосов, клапанов и др. гидравлических элементов. При этом машинное время расчета на ПК составило менее 1 мин. Результаты, полученные с использованием разработанной методики, хорошо согласуются с численными данными, предоставленными ПАО «ОКБ Сухого».

Кроме этого был осуществлен связанный расчет гидравлической системы. Здесь для участка цепи было осуществлено моделирование трехмерного течения с использованием ПП ЛОГОС. Цель проводимого расчета – сделать вывод о возможности возникновения кавитации в трехмерном участке. На рис. 6 приведен фрагмент гидравлической схемы, отдельно выделен трехмерный участок и показана его геометрия.

В результате проведенного связанного расчета стационарного течения в указанной схеме, были получены следующие результаты:

- скалярные поля давления и скорости в трехмерном участке цепи;
- профили давления и газосодержания вдоль оси трубопровода;
- по величине давления были сделаны выводы о том, что отсутствуют условия для возникновения кавитации.

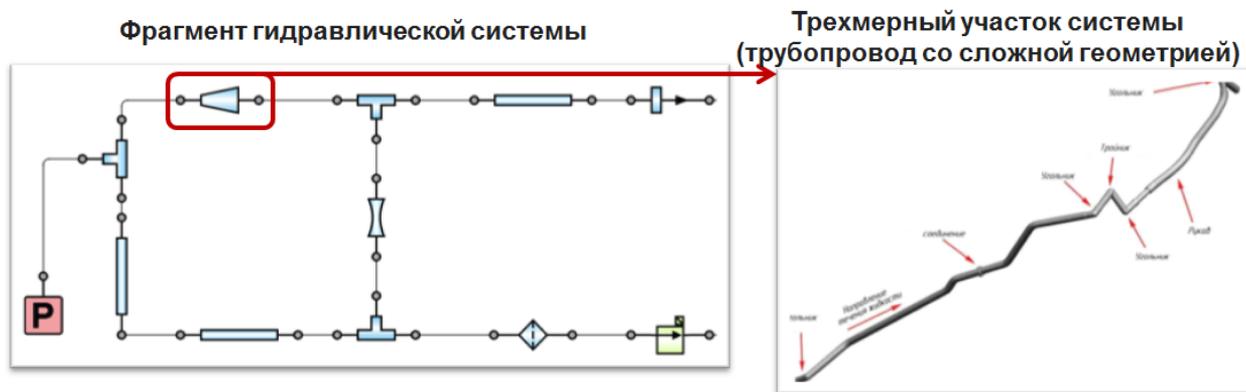


Рис. 6. Фрагмент схемы, собранной для проведения связанного расчета

Основные результаты, полученные по итогам проведенной работы:

- разработана методика моделирования одномерного изотермического течения несжимаемой жидкости;
- разработанная методика реализована в программном продукте, который предназначен для проектирования расчетных схем, расчета и просмотра результатов;
- разработана и реализована методика проведения связанных одномерных и трехмерных расчетов;
- разработанная методика моделирования одномерного изотермического течения несжимаемой жидкости верифицирована и апробирована на промышленных задачах.

Литература

1. Бедретдинов И. Штурмовик Су-25 и его модификации. М.: ООО «Издательская группа «Бедретдинов и Ко». 2002.
2. [Electronic resource]. Mode of Access: <https://www.iei.liu.se/flumes/system-simulation/hop-san?l=en>
3. [Electronic resource]. Mode of Access: <https://www.mentor.com/products/mechanical/flowmaster/1d-3d-cfd/>
4. [Electronic resource]. Mode of Access: http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/lms/imagine-lab/amesim
5. Погосян М. А., Савельевских Е. П., Шагалиев Р. М., Стрелец Д. Ю., Рябов А. А., Корнев А. В., Дерюгин Ю. Н., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 2. С. 3–17.