

Алгоритм моделирования рабочих процессов в трубопроводах сложной пространственной конфигурации и его программная реализация

© А.В. Чернышев¹, А.В. Николаева², А.П. Скибин²,
А.А. Крутиков², О.В. Белова¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Московская область, Подольск, 142103, Россия

Современное программное обеспечение, используемое для проведения расчетов гидродинамики и теплопереноса, позволяет разрабатывать пользовательское программное обеспечение, помогающее автоматизировать процесс проведения численных расчетов. Авторами предложен термин «виртуальный стенд», который описывает алгоритм построения такого программного обеспечения и программный код. В данной статье изложен алгоритм для автоматизации процесса моделирования теплогидравлических процессов в системах трубопроводов сложной пространственной конфигурации, а также особенности процедуры создания соответствующего программного обеспечения в программном комплексе Star-CD 4.16 с применением языка программирования Java.

Ключевые слова: системы трубопроводов, алгоритм, автоматизация вычислений, Star-CD, Java.

Введение. При проектировании пневмогидравлических систем сложно обойтись без прочностных расчетов и расчетов течения среды в трубопроводах. Наиболее передовыми подходами к моделированию процессов в пневмогидравлических системах являются подходы, основанные на решении уравнений Навье — Стокса численными методами или, как принято их называть в западной литературе, — CFD (Computational Fluid Dynamics)-методами.

Одним из факторов, приводящих к значительным временным затратам при моделировании рабочих процессов в пневмогидравлических системах, является необходимость выполнения расчетов практически на всех этапах моделирования в ручном режиме. Наиболее длительным этапом является построение сеточных моделей [1, 2], при этом даже незначительное изменение конструкции проточной части пневмогидравлической системы (например, при проведении вариантных расчетов или при оптимизации существующей конструкции) приводит к необходимости полной перестройки модели. Это снижает ценность подхода и приводит к увеличению стоимости

расчетов. Автоматизация процесса моделирования позволяет в десятки раз сократить временные затраты, требуемые на расчеты, и снизить вероятность возникновения ошибок при выполнении рутинных операций [2, 3].

В рамках данной работы предложен **алгоритм** для автоматизации процесса моделирования процессов теплопереноса в системах трубопроводов сложной пространственной конфигурации, а также приведены особенности процедуры создания соответствующего **пользовательского программного обеспечения** («виртуального стенда») в программном комплексе STAR-CD 4.16 [3] с применением языка программирования JAVA [4].

Алгоритм моделирования рабочих процессов состоит из следующих этапов:

- обнуление информации — зачистка рабочих файлов;
- задание исходных данных;
- построение сеточной модели;
- задание начальных и граничных условий;
- задание свойств рабочей среды;
- численное решение;
- обработка результатов расчета.

Базовая структура предлагаемого алгоритма для реализации в среде программного комплекса STAR-CD представлена в виде блок-схемы взаимосвязей отдельных действий (рис. 1).

На первом этапе после загрузки рабочей среды pro-star [5] предполагается проведение **зачистки рабочих файлов** (файлов исходных данных и файлов с результатами) и освобождение оперативной памяти от всех типов данных (координаты и номера опорных узлов ячеек, ячеек, сплайновых структур сеточной модели и т.д.).

На втором этапе **формируются файлы исходных данных**, содержащие сведения о геометрических параметрах расчетной области, граничных и начальных условиях, а также о параметрах рабочего тела. Для корректного ввода исходных данных необходимо предварительно провести параметризацию геометрических параметров объекта исследования, а также определить исследуемый диапазон изменения параметров рабочей среды, значения начальных и граничных условий (определяется при постановке задачи).

Для автоматизации процесса ввода исходных данных предлагается использовать один из широко применяемых языков программирования — Java или Fortran. На рис. 2 представлен общий вид панели ввода исходных данных Data, выполненной на языке Java. В результате работы панели Data записывается текстовый файл Data.dat, который представляет собой файл исходных данных для основной программы, реализованной в среде Pro-star (программный комплекс STAR-CD).

При этом ниспадающее меню Help содержит краткую справку с описанием переменных, используемых при работе данной пользовательской панели.

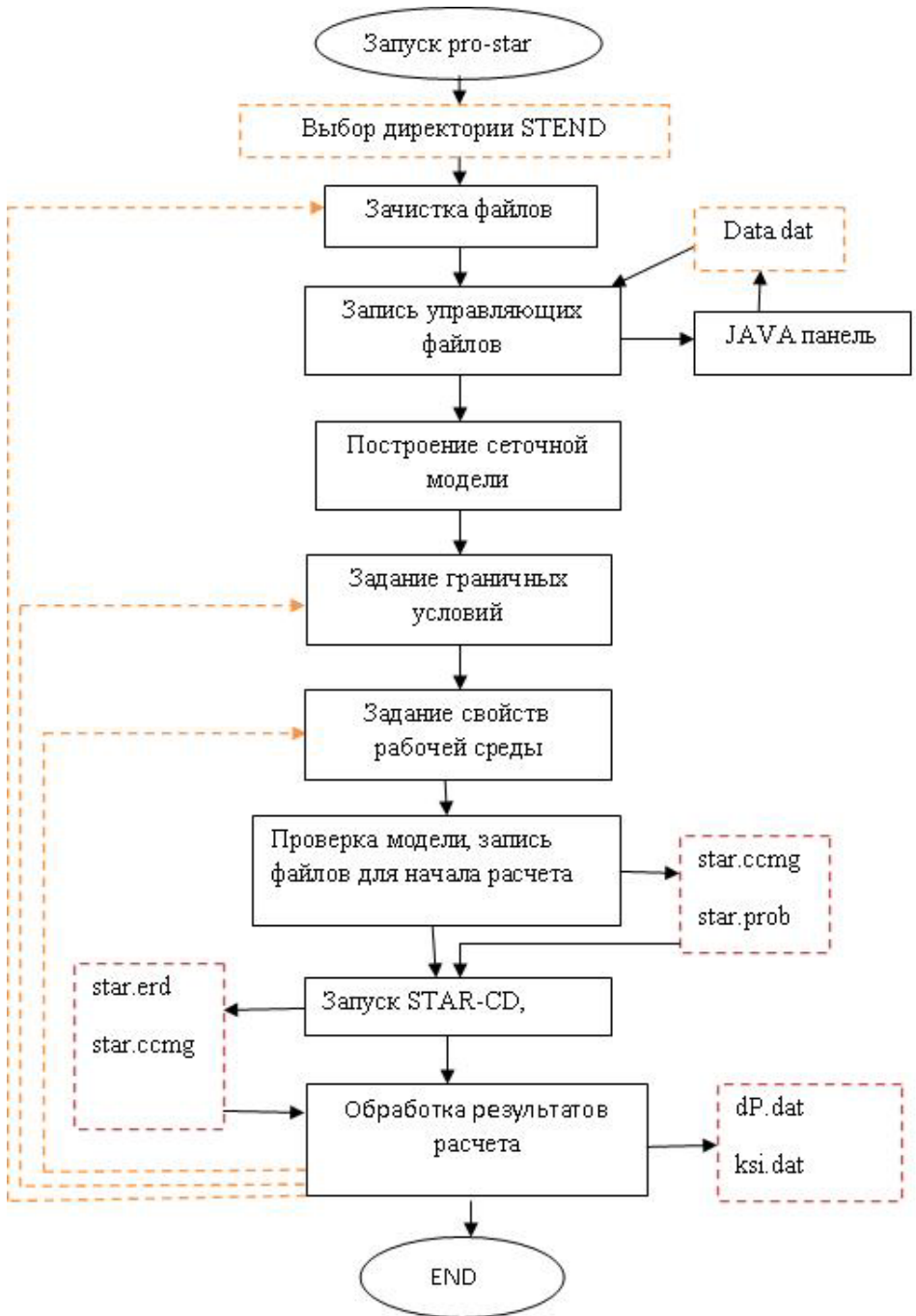


Рис. 1. Блок-схема базового алгоритма автоматизации расчетных исследований

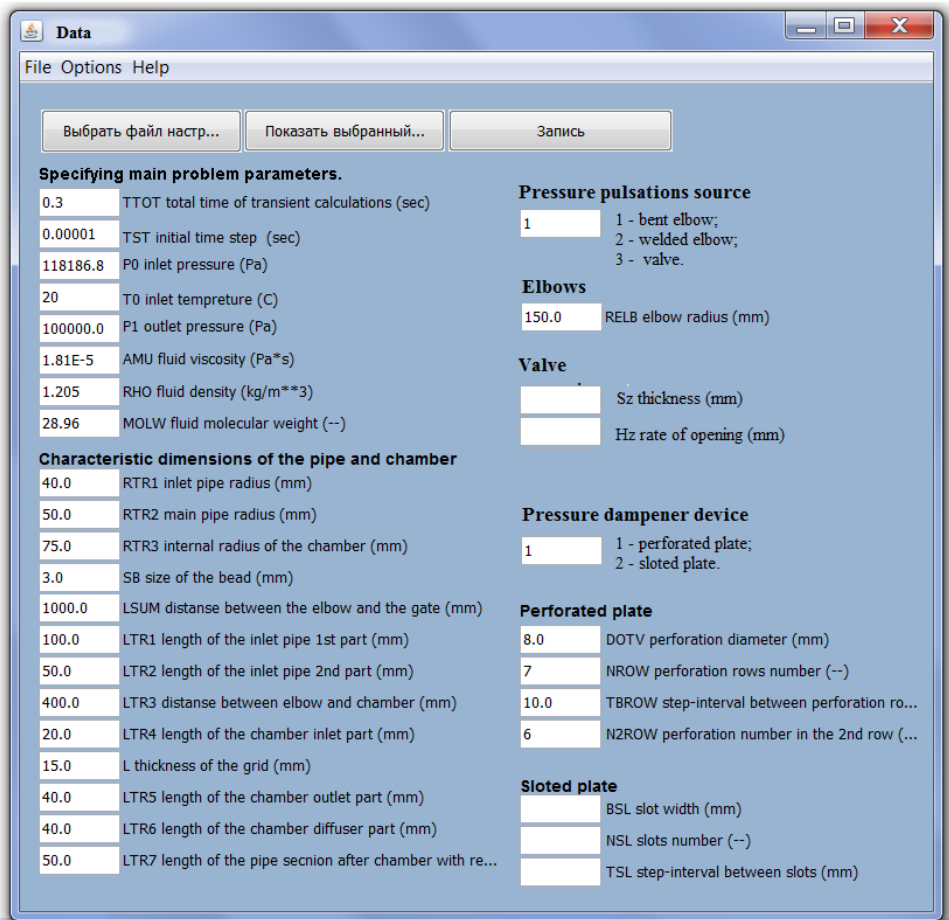


Рис. 2. Общий вид панели ввода исходных данных

Для моделирования процессов тепломассопереноса в системах трубопроводов CFD-методами, как правило, применяют структурированные или блочно-структурированные гексаэдрические сеточные модели. Это обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, технология построения блочно-структурированных сеточных моделей позволяет получить наименее ресурсоемкую модель с наименьшими погрешностями дискретизации. Во-вторых, для систем трубопроводов характерно наличие слоистых течений. Поэтому для моделирования процессов в таких системах практически невозможно добиться сходимости решения с отстройкой профиля скорости, характерного для трубопровода, при использовании неструктурированных сеточных моделей.

В рамках предлагаемого алгоритма этап построения блочно-структурированной сеточной модели разбит на следующие шаги:

- ввод геометрических параметров, определяющих геометрию расчетной области на основе данных, описанных в файле Data.dat;

- разбиение относительно сложной геометрии расчетной области на n -е количество более простых подобластей — блоков. Для систем трубопроводов характерны такие конфигурации блоков, как цилиндры, тороидальные поверхности и усеченные конусы (реже применяются другие формы блоков);

- построение базовых сплайнов конструкции — вспомогательных элементов, определяющих распределение контрольных объемов сеточной модели в поперечном сечении участка трубопровода, а именно, параметров пристеночных контрольных объемов и контрольных объемов в ядре потока с учетом особенностей топологии расчетной области сложной пространственной конфигурации;

- создание структурированных пространственных сеточных моделей отдельных блоков путем разбиения блоков на призматические контрольные объемы. На рис. 3 приведен пример характерной сеточной модели блока (прямой участок трубопровода);

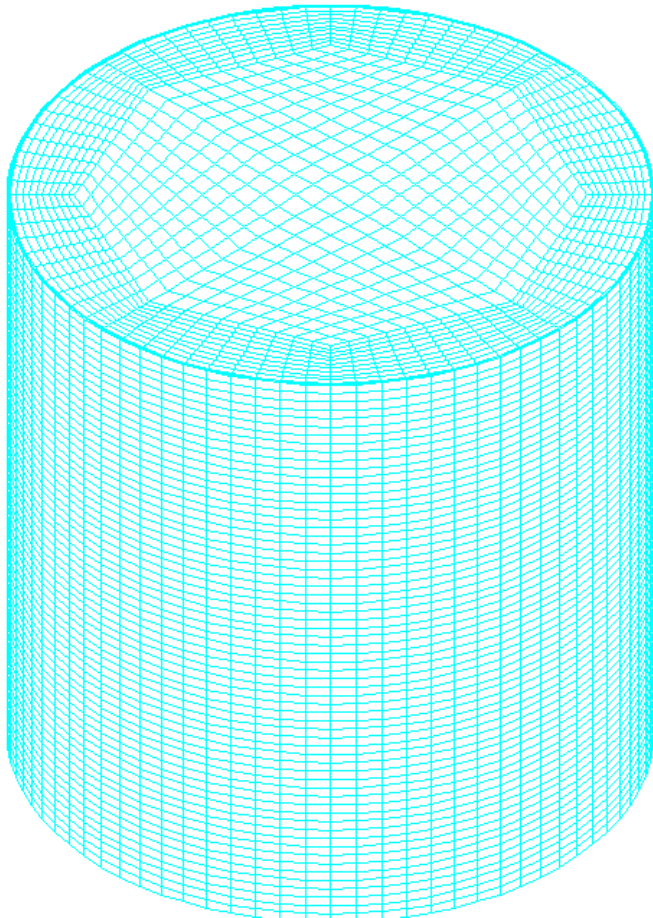


Рис. 3. Сеточная модель, характерная для прямого участка трубопровода

- оценка качества сеточных элементов (наличие сеточных элементов с соотношением длин граней, превышающим 10; наличие пересекающихся граней в сеточной модели; наличие углов между соседними гранями сеточных элементов, близких к 0 или к 180°) [1, 2, 5] и корректировка сеточных моделей отдельных блоков;

- запись сеточных моделей отдельных блоков в виде двух файлов. Первый файл (XX.vrt, где XX — номер блока) содержит номера и координаты каждого опорного узла, а второй (XX.cel) — номера всех ячеек и узлов, на базе которых они построены;

- сборка полной разностной сеточной модели расчетной области. Процедура сборки сеточной модели представляет собой считывание сеточных моделей отдельных блоков (чтение файлов XX.vrt и XX.cel) с последующей установкой каждой из них в соответствующие координаты глобальной системы координат и созданием специальных межсеточных связей на поверхностях стыковки сеточных моделей соседних блоков для перестроения конечно-разностных гексагональных сеточных моделей на поверхностях стыковки отдельных блоков в многогранные ячейки.

Такой подход позволяет создать качественную блочно-структурированную сеточную модель проточной части пневматической системы.

Каждый из предложенных этапов, а особенно те, которые отвечают за построение базовых сплайнов и внутреннее разбиение блоков, содержат определенное количество вложенных процедур, зависящих от возможностей среды, в которой реализован алгоритм, в данном случае – STAR-CD 4.16. [5].

Базовый алгоритм автоматического построения сеточных моделей представлен в виде блок-схемы взаимосвязей отдельных действий на рис. 4.

Разработка «виртуального стенда». «Виртуальный стенд» представляет собой пользовательское программное обеспечение, которое разрабатывается как приложение к программному коду и служит для автоматизации процесса вычислений и обработки результатов вычислений. Разработка такого приложения позволяет на порядок повысить скорость вычислений, а самое главное, избежать ошибок при задании изменяющихся параметров вычислений.

Для создания «виртуального стенда» каждый из этапов предложенного алгоритма программируется на внутреннем языке среды Pro-star [3]. При построении сеточной модели, а также при задании начальных и граничных условий, свойств рабочей среды процедура численного решения и обработки результатов расчетов осуществляются согласно особенностям постановки конкретно взятой задачи и описываются с помощью команд среды Pro-star в виде исполнительных файлов (для среды MS Windows — формат файлов *.bat и *.inp).

Для создания пользовательских панелей применяется язык Java [6] и внутренние возможности среды Pro-star (исполнительные файлы формата **** .pnl**).

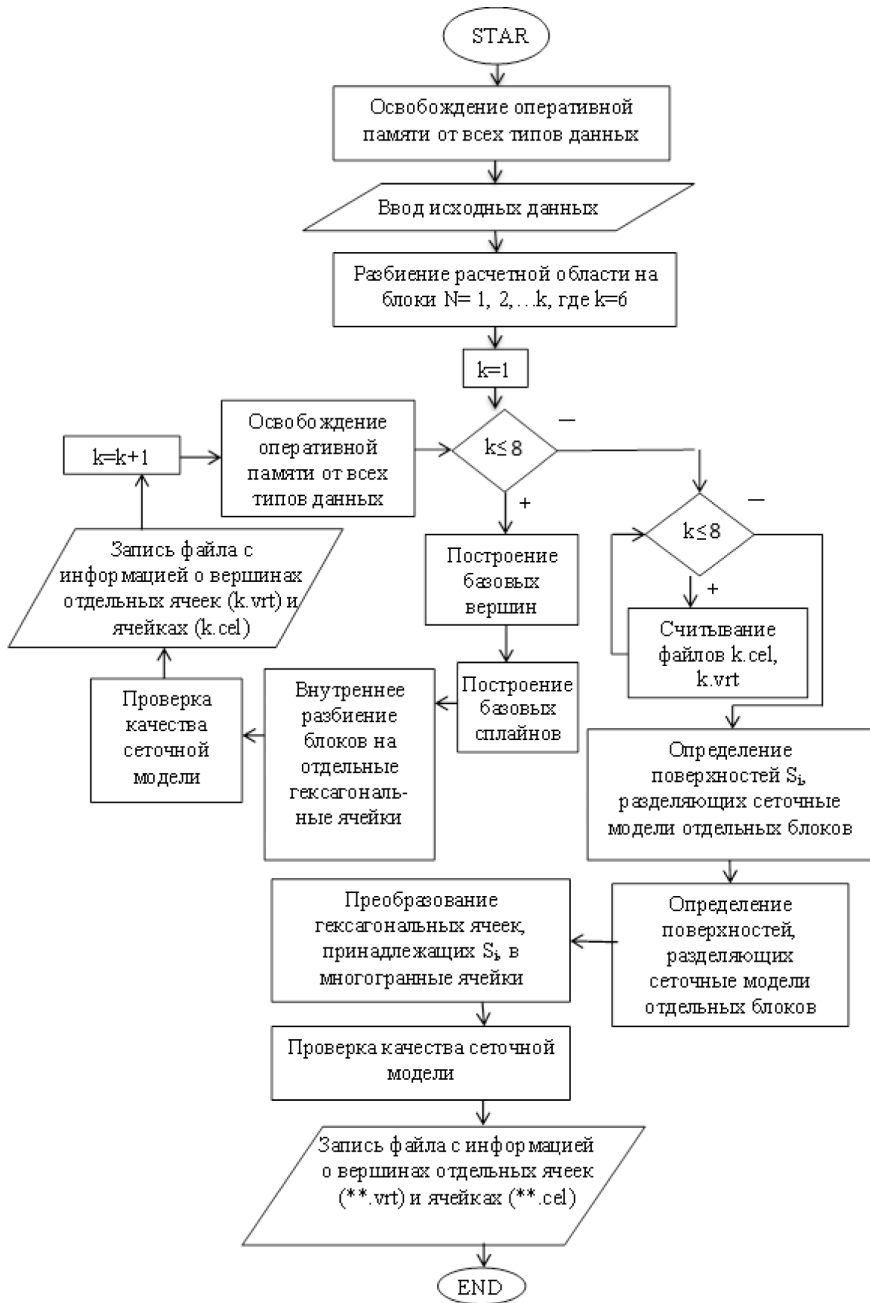


Рис. 4. Базовый алгоритм автоматического построения сеточных моделей

В расчетном коде Star-CD имеется внутренний интерпретатор команд. Поэтому для повышения производительности труда рациональным является создание дополнительной **пользовательской панели**, позволяющей упростить ввод исходных данных, организовать построение разностной сеточной модели, задание граничных и начальных условий, математических параметров, проведение расчетов и обработку результатов расчетов в автоматическом режиме.

Интерфейс коммуникаций пользователя с параметрами алгоритма организован посредством единой управляющей панели, названной в данном случае «STEND panel» (исполнительные файлы формата *.pnl). Каждый элемент панели вызывает файл формата *.inp, который имеет цифровое обозначение типа 01.xx, где xx — порядковый номер элемента. Использование панели возможно как в графическом, так и в текстовом режиме. Для работы в графическом режиме используется манипулятор типа «мышь», в текстовом режиме запуск осуществляется командой ifile 01_xx.inp. Вид управляющей панели «STEND panel» представлен на рис. 5.

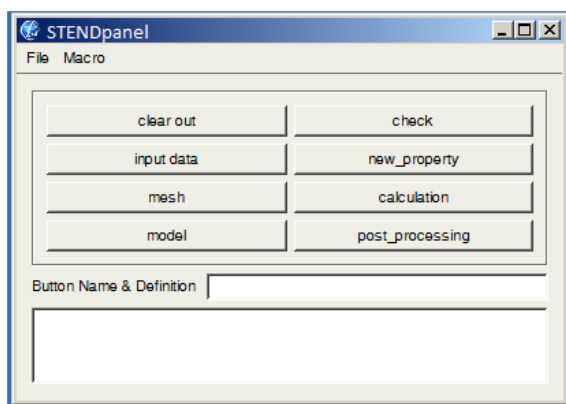


Рис. 5. Управляющая панель STENDpanel

В состав панели входят десять исполнительных элементов:

- «clear out»;
- «input data»;
- «mesh»;
- «model»;
- «check»;
- «new property»;
- «calculation»;
- «post processing».

Элемент «clear out» — очистка; запускает освобождение оперативной памяти от всех типов данных (координаты узлов, номера опорных узлов ячеек, сплайновые геометрические структуры и т. д.).

Элемент «input data» — ввод исходных данных; загрузка панели «data» (рис. 2), которая осуществляет запись файла исходных данных Data.dat, содержащего данные о геометрических параметрах расчетной области, параметрах рабочего тела и о других параметрах компьютерной модели.

Элемент «mesh» — построение сеточной модели; осуществляет построение сеточной модели на основе файла исходных данных Data.dat в соответствии с алгоритмом, приведенным на рис. 1.

Элемент «model» — модель; осуществляет ввод соотношений математической модели в соответствии с постановкой задачи и данными, содержащимися в файле Data.dat.

Элемент «check» — проверка; запускает проверку качества сеточной модели и поиск возможных ошибок при реализации математической модели внутренними средствами среды Pro-star.

Элемент «new property» — новые параметры; позволяет изменить параметры рабочего тела и параметры математической модели без перестроения сеточной модели, что удобно при расчетах теплогидравлических характеристик пневмогидравлических систем.

Элемент «calculation» — запускает задачу на расчет.

Элемент «post processing» — обработка результатов расчета; осуществляет расчет результирующих параметров, например коэффициентов гидравлического сопротивления, среднеквадратичного значения амплитуды и т.д., и осуществляет запись файлов с искомыми параметрами в формате *.dat или *.txt. Эти файлы являются обычными текстовыми файлами, с которыми легко работать при дальнейшей обработке результатов исследования.

В качестве примера на рис. 6 показан общий вид панелей графического интерфейса для выполнения расчетных исследований, приведенных в работах [7–9], полученный при программной реализации

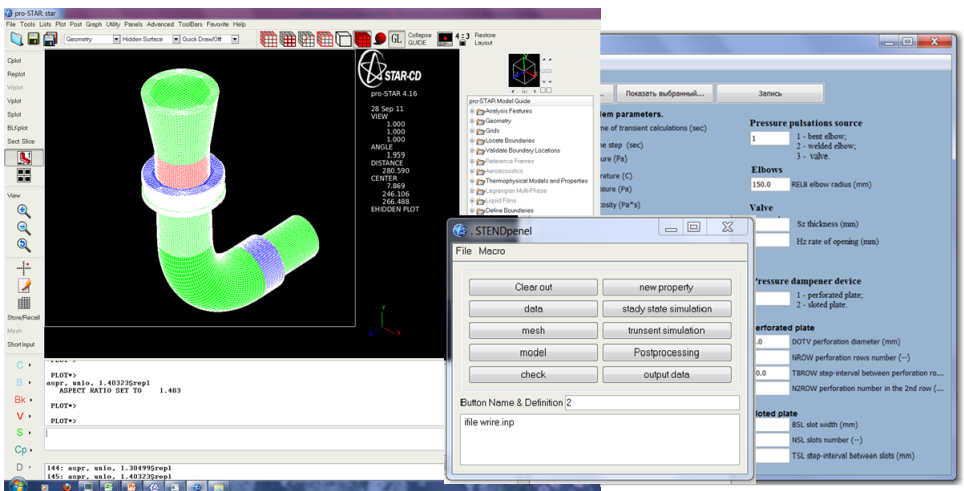


Рис. 6. Общий вид панелей графического интерфейса

автоматизированного алгоритма моделирования рабочих процессов (рис. 1 и рис. 4) в системах трубопроводов.

Обязательным этапом при построении виртуальных стендов является предварительная отладка и тестирование моделей для обеспечения качества расчетов. Для этого международным сообществом принята процедура [1, 2], состоящая из таких этапов, как валидация и верификация. Этот комплекс дополнительных исследований позволяет оценить и повысить точность результатов CFD-расчетов.

Процесс валидации при этом представляет собой многоступенчатую отладку математической модели для того, чтобы гарантировать, что ошибка в количественной оценке рассчитываемых величин, связанная с особенностями сеточной модели, величиной шага по времени (для расчетов нестационарных процессов), выбором порядка разностной схемы, выбором модели турбулентности и т.д., сведена к минимуму. Под верификацией понимают совокупность исследований по оценке адекватности разработанной (выбранной) математической модели реально существующим рабочим процессам, протекающим в объекте исследования (как правило, на основе сопоставления результатов моделирования с экспериментальными, аналитическими данными и т. д.).

Выводы. Разработан алгоритм моделирования рабочих процессов в трубопроводах сложной пространственной конфигурации и приведены основные особенности его программной реализации в программном комплексе STAR-CD с применением языка JAVA для создания панелей графического интерфейса. Использование алгоритма позволяет во много раз упростить и ускорить процесс создания компьютерных моделей и сократить объемы работ при выполнении оптимизационных и вариантных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications.* /Nea/CSNI/R (2007), 5, 154 p.
- [2] *Computational fluid dynamics best practice guidelines for dry cask applications. Final report.* NUREG-2152, U.S. NRC, 2013, 117 p.
- [3] Петров В.Е. *Методическое и алгоритмическое обеспечение системного анализа гидродинамических процессов и прогнозирования рабочих характеристик промышленных погружных центробежных насосов.* Дисс. ... канд. техн. Наук. Серпухов, МОУ «Институт инженерной физики», 2012, 179 с.
- [4] Разработка конструкции элемента проточной части. *Наука и современность.* Докл. международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2011, с. 260–264.
- [5] *Methodology STAR-CD VERSION 4,16,* CD-adapco Group, 2011.
- [6] *Java (JRE) Ver. 6.* USER GUID SUN MICROSYSTEM INC, 2012.

- [7] Повышение эффективности пневматических систем с устройствами гашения пульсации давления. *Компрессорная техника и пневматика*, 2012, № 4, с. 34–40.
- [8] Исследование рабочих процессов в пневматических системах с устройствами гашения пульсации давления. *Компрессорная техника и пневматика*, 2012, № 5, с. 42–48.
- [9] К вопросу о прогнозировании амплитуд пульсации давления в системах трубопроводов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*, 2012, № 3 (88), с. 3–16.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Чернышев А.В., Николаева А.В., Скибин А.П., Крутиков А.А., Белова О.В. Алгоритм моделирования рабочих процессов в трубопроводах сложной пространственной конфигурации и его программная реализация. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/762.html>

Чернышев Андрей Владимирович родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и электропневматического оборудования различного назначения. e-mail: av-chernyshev@yandex.ru

Николаева Анна Владимировна родилась в 1986 г., окончила Московский энергетический институт (Технический университет) в 2009 г. Канд. техн. наук, инженер-конструктор ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Автор более 20 научных работ и 3 патентов РФ.

Скибин Александр Петрович родился в 1963 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1986 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1988 г. Канд. техн. наук, начальник бюро ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Автор более 80 научных работ в области вычислительной гидрогазодинамики и тепломассообмена. e-mail: askibin@yandex.ru

Крутиков Алексей Александрович родился в 1981 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Канд. техн. наук, инженер-конструктор ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Автор более 20 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов в элементах пневмогидравлических систем.

Белова Ольга Владимировна родилась в 1971 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1995 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области компьютерного моделирования инженерных систем. e-mail: ovbelova@yandex.ru