

Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем

© О.В. Белова¹, В.Ю. Волков², А.П. Скибин³,
А.В. Николаева³, А.А. Крутиков³, А.В. Чернышев¹

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

² ОАО ВНИИАЭС, Москва, 141980, Россия

³ ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Московская область, Подольск, 142103, Россия

Авторами предложена методология проведения численных исследований в области гидродинамики и теплообмена. Данные методы исследований нашли широкое применение во всех областях промышленности, особенно авиационной, автомобильной, энергетической и нефтегазовой. Однако использование таких методов без четко разработанной методики приводят к получению недостоверных результатов, что, в свою очередь, может повлечь серьезные последствия. Именно этим объясняется очень ограниченное применение численных методов, например, в атомной промышленности и на предприятиях военно-промышленного комплекса. В то же время, использование изложенной методики, которая апробирована при решении широкого круга задач, позволяет получить достоверные результаты и определить требуемые параметры объекта исследования с необходимой точностью и одновременно с приемлемыми временными затратами.

Ключевые слова: метод расчета, CFD, пневмогидравлическая система.

Введение. На протяжении многих лет для научно-инженерного персонала единственным доступным подходом к моделированию тепло-гидравлических процессов в пневмогидравлических системах (ПГС) являлось применение эмпирических и полуэмпирических методик расчета. Несмотря на очевидные преимущества полуэмпирических методик по сравнению с эмпирическими, они обладают рядом недостатков, обусловленных ограниченной областью их применения и необходимостью большого количества экспериментальных данных.

В качестве альтернативы эмпирическим и полуэмпирическим методикам мировым сообществом рассматриваются подходы, в основе которых лежит механика сплошных сред, CFD-методы (Computational Fluid Dynamics), когда система уравнений Навье—Стокса или Рейнольдса решается с помощью численных методов. Однако, несмотря на бурное развитие CFD-методов, выражающееся в постоянном расширении области их применения и повышении точности результатов моделирования [1–11], применение этих методов не всегда

оправдывает ожидания пользователя [12]. Это обусловлено в основном отсутствием сегодня в Российской Федерации профильной подготовки специалистов — квалифицированных CFD-инженеров для научно-производственных структур, а также отсутствием специализированной учебной и методической литературы. За небольшим исключением, пользователи CFD-пакетов при проведении исследований руководствуются собственным опытом и опытом коллег и лишь иногда — справочными материалами и руководствами пользователей, которые сопровождают программное обеспечение. Следствием сложившейся ситуации является низкая точность, а иногда недостоверность результатов расчетов.

В связи с этим сейчас, как никогда, актуально создание методологии основ проведения CFD-расчетов с целью их систематического применения при выполнении исследований, в том числе в области ПГС. Работа в данном направлении позволит готовить высококвалифицированных специалистов, которые смогут качественно улучшить ситуацию с применением CFD-методов на предприятиях военно-промышленного комплекса, авиационной, космической, ядерной, энергетической и многих других отраслей.

Методика проведения CFD-расчетов. Совершенно ясно, что ввиду широкого спектра процессов, протекающих, например, в ПГС, практически невозможно составить универсальную методику для проведения расчетов с помощью CFD-методов. Однако на основе опыта, накопленного международным сообществом, можно составить следующую последовательность действий для качественного выполнения численных исследований.

1. Постановка задачи исследования на основе экспертного анализа.
2. Выбор метода расчета.
3. Разработка физической модели.
4. Выбор расчетного кода.
5. Выбор и построение расчетной области.
6. Разработка компьютерной модели.
7. Валидация результатов численного моделирования.
8. Верификация результатов численного моделирования.
9. Разработка отчетной документации.

Остановимся на каждом из этапов подробнее.

Одним из наиболее важных этапов при проведении CFD-расчетов является **постановка задачи исследования**. Именно на этом этапе совершается большинство ошибок, которые возможно выявить лишь на завершающем этапе верификации математической модели. Цена подобных ошибок чрезвычайно высока, поскольку последствием является необходимость повторного проведения всего цикла расчетных исследований. Более того, для квалифицированной постановки зада-

чи необходимы как знания в области математического моделирования, так и инженерные знания об особенностях конструкции объекта исследования и протекающих в нем рабочих процессах. По этой причине постановка задачи, как правило, осуществляется группой экспертов с письменным описанием всех особенностей объекта исследования и включает в себя следующие промежуточные этапы:

1) постановка задачи исследования в письменном виде, включая анализ и описание физических явлений (рабочих процессов), параметры рассматриваемого объекта (геометрические, физические и т.д.) и перечисление целей и задач исследования;

2) выбор группы экспертов и проведение анализа особенностей постановки задачи экспертной группой (Phenomena Identification and Ranking Table, PIRT-анализ), основанного на письменном описании задачи [1];

3) анализ особенностей рассматриваемой задачи (например, наличия процессов конденсации или кипения среды), требующих дополнения стандартных моделей CFD-кодов [1] или использования специализированных CFD-кодов;

4) на основе анализа особенностей постановки задачи принимается решение об использовании или CFD-методов, или классических полуэмпирических подходов, а в некоторых случаях принимается решение о необходимости сопряжения этих подходов;

5) на основе анализа данных о задаче исследования и о рассматриваемых физических процессах выбирается соответствующий CFD-код, и, если необходимо, разрабатываются дополнения и приложения к выбранному CFD-коду.

Выбор метода расчета. CFD-методы в ближайшее время не смогут полностью заменить классические полуэмпирические подходы по следующим причинам:

- количество ячеек (контрольных объемов), которые необходимо использовать для описания процессов в ПГС при применении CFD-кодов, значительно превышает границы возможностей современной вычислительной техники;

- по скорости вычислений CFD-коды значительно уступают кодам, основанным на полуэмпирических подходах;

- отсутствуют надежные замыкающие соотношения для описания трехмерных многофазных потоков;

- не в каждом случае, представляющем практический интерес, необходимо детальное моделирование рабочих процессов в трехмерной постановке.

Несмотря на рассмотренные особенности, связанные с применением CFD-кодов, этот инструмент в руках квалифицированного специалиста является очень точной технологией. Однако, как и любой

прецизионный инструмент, современные коммерческие CFD-пакеты общего назначения имеют очень сложную структуру и требуют высокой концентрации внимания пользователя. Широкое применение подобных кодов в промышленности привело к необходимости создания документов, регламентирующих работу с CFD-кодами [12], для снижения влияния такого субъективного фактора, как квалификация инженера-расчетчика, на конечный результат исследований.

Куда более эффективно использование CFD-методов там, где требуется получить подробную картину процессов в какой-либо системе. Проблема также заключается в том, что большинство макропроцессов в ПГС является нестационарным и локальная ситуация может в значительной степени зависеть от различных процессов в масштабах всей системы. Это означает, что необходимо непосредственное взаимодействие CFD-модели с существующими упрощенными полуэмпирическими подходами для локального трехмерного моделирования в зависимости от параметров установки в целом. Этот подход является наиболее привлекательным, поскольку он сохраняет накопленный опыт и надежность традиционных полуэмпирических подходов, но, в свою очередь, расширяет их возможности в области моделирования отдельных явлений. Тем не менее вопрос о прямом CFD-моделировании остается актуальным.

При этом существует масса возможностей для сопряжения различных подходов для моделирования теплогидравлических процессов:

- использование пре- и постпроцессоров CFD-кодов для визуализации результатов расчетов, в основе которых заложены полуэмпирические методы;
- сопряжение пространственных теплогидравлических кодов с CFD-кодами так, что часть расчетной области определяется теплогидравлическими методами, а часть — CFD-кодом, что позволяет значительно сократить затраты вычислительных мощностей и времени на проведение расчета;
- замена пространственными теплогидравлическими кодами CFD-кодов при проведении вариантных расчетов для несопряженных задач: поля скоростей и давлений рассчитываются при помощи CFD-кодов, а затем по полученным результатам определяются замыкающие соотношения для теплогидравлического подхода и проводится ряд расчетов по определению полей температур;
- применение CFD-кодов для определения замыкающих соотношений для полуэмпирических подходов, и наоборот;
- создание новых (или модернизация существующих) пространственных теплогидравлических кодов, сопряженных с CFD-кодами: расчетная область является единой, дискретизация для теплогидравлического кода на 3...4 порядка более грубая, чем для CFD-кода,

а необходимые замыкающие соотношения для теплогидравлики определяются непосредственно из обработки результатов CFD-расчета;

- совместное применение CFD-кодов и полуэмпирических подходов: коды имеют разные расчетные области и работают независимо друг от друга, связь между ними осуществляется только путем обмена данными через внешние файлы.

Таким образом, целесообразность применения того или иного подхода к моделированию процессов определяется для каждого отдельно взятого случая в соответствии с целями и задачами конкретного исследования, особенностями постановки задачи и имеющимися в наличии вычислительными ресурсами.

Разработка физической модели. Большинство тепло-гидравлических явлений в ПГС включает локальные и глобальные эффекты, такие как температурное расслоение, сталкивающиеся струи, изменение уровня, противоточные течения, теплопередача и т.д. Совокупность принимаемых во внимание физических процессов представляет собой физическую модель объекта исследования. Физическая модель разрабатывается на основе PIRT-анализа экспертной группой. В общем случае процесс выбора физических моделей состоит из следующих этапов:

- 1) разработка общих представлений о диапазоне рассматриваемых физических явлений и предположительном распределении полей параметров в расчетной области (часть PIRT-анализа [1]);

- 2) формулировка основных допущений и предположений [13, 14];

- 3) выбор метода моделированию турбулентного переноса (RANS (Reynolds-averaged Navier—Stokes), U-RANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier—Stokes), LES (Large Eddy Simulation), DNS (Direct Numerical Simulation), DES (Detached-Eddy Simulation), гибридные модели турбулентности и т.д.) [1, 15, 16];

- 4) выбор и настройка соответствующей модели в рамках выбранного метода [1, 15, 16].

Выбор расчетного кода. Выбор расчетных кодов зачастую делается из соображений удобства, привычек и стоимости или на основе их комбинации. Для так называемых тяжелых коммерческих кодов (STAR-CD и STAR-CCM+ компании CD-adapco; Fluent и CFX компании ANSYS) окончательный выбор пользователя крайне редко зависит от возможностей кода, поскольку все они содержат похожий набор математических моделей. Исключением может быть необходимость решения задач, связанных с использованием последних модификаций математических моделей, таких как модели турбулентности LES (Large Eddy Simulation), SAS (Scale-Adaptive Simulation) и т. д., которые требуют использования определенных версий конкрет-

ного программного обеспечения. Однако при выборе кода необходимо обратить внимание на следующие их особенности:

- максимальная размерность сеточных моделей, с которой может работать конкретный код (особенно важно при необходимости полномасштабного моделирования работы ПГС);
- соотношение возможностей кода и имеющегося вычислительного оборудования;
- скорость счета (зависит от качества распараллеливания кода и алгоритмов расчета, заложенных в решатель кода);
- перечень доступных математических моделей;
- возможности кода для построения сеточных моделей;
- качество графического интерфейса и возможности работы в рамках кода с отключенным графическим интерфейсом (что особенно важно при необходимости автоматизации моделирования и разработки виртуальных стендов [17, 18], которые позволяют снизить вероятность ошибки и временные затраты);
- возможность получения дополнительных опций и качественной технической поддержки, предоставляемых разработчиками программного обеспечения.

Важным этапом процесса моделирования является *выбор и построение расчетной области*. На этом этапе закладываются основные допущения и упрощения в расчетной области и осуществляется подготовка CAD-модели (Computer-Aided Design) для автоматического построения сеточной модели (если необходимо).

Для ПГС характерны большие габаритные размеры и сложная геометрическая конфигурация расчетной области. Ограниченные вычислительные ресурсы приводят к необходимости внесения упрощений в геометрию расчетной области (уход от полномасштабного моделирования за счет применения соответствующих граничных условий, пренебрежение отдельными мелкими деталями и т. д.). Однако любое изменение в геометрии расчетной области является осознанным риском, поскольку ведет к изменению исходных данных (геометрических параметров, выданных конструктором). Кроме того, наличие ошибок и неточностей в CAD-моделях может привести к значительным трудностям на последующих этапах, например на этапе построения сеточной модели.

Поэтому, несмотря на искушение формально пройти этап «выбора и построения расчетной области», рекомендуется скрупулезное выполнение следующего минимально возможного перечня действий:

- 1) выбор удобной системы координат;
- 2) выбор единиц измерения;
- 3) внесение необходимых упрощений в расчетную область;
- 4) построение расчетной области;

5) проверка, вносят ли принятые упрощения в расчетной области какие-либо изменения, ограничения и т.д. в результаты моделирования;

6) постановка граничных условий и оценка их адекватности с точки зрения погрешности вычислений.

Разработка компьютерной модели. Весь процесс получения практической информации методами вычислительной гидрогазодинамики для задач, связанных с течением жидкости или газа, можно представить в виде схемы (рис. 1).



Рис. 1. Схема применения методов вычислительной гидрогазодинамики

В общем случае исходная система линейных дифференциальных уравнений в частных производных состоит из:

• уравнений движения (уравнений Навье—Стокса или осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса для случаев, описывающих турбулентные течения);

- уравнения неразрывности;
- уравнения сохранения энергии;
- уравнения состояния,
- начальных и граничных условий.

В подавляющем большинстве случаев такая система уравнений не имеет аналитического решения, поэтому необходимо применение численных методов для получения приближенного численного решения [19–21].

Процесс построения численного решения можно разбить на несколько шагов (рис. 2). На первом шаге дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие непрерывный процесс, а также вспомогательные (граничные и начальные) условия преобразуются в дискретную систему алгебраических уравнений. Этот шаг называется *дискретизацией*.

Сегодня наиболее востребованными *методами дискретизации* являются следующие:

- метод конечных разностей (МКР);
- метод конечных элементов (МКЭ);
- метод контрольных объемов (МКО).

При применении этих методов дискретизации записывается система алгебраических уравнений, связывающих между собой значения искомых параметров в группе соседних узлов ячеек. При этом подразумевается, что объект исследования представляется в виде сеточной модели, состоящей из дискретных узлов (или объемов), распределенных по всей расчетной области во времени и в пространстве. Для каждого из узлов или объемов сеточной модели записываются законы сохранения искомой величины в виде дискретного аналога исходных дифференциальных уравнений, описывающих непрерывное распределение параметров в расчетной области.

Второй шаг процесса решения (см. рис. 2) подразумевает *алгоритм решения* полученной системы алгебраических уравнений. Так, для решения системы дифференциальных уравнений, описывающей движение несжимаемой жидкости, обычно используют SIMPLE-подобные итерационные *алгоритмы* SIMPLE, PISO, SIMPLER, SIMPLEXIC и т. д. [22].

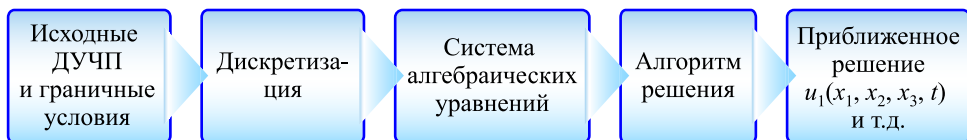


Рис. 2. Процесс построения численного решения

Таким образом, процесс *разработки компьютерной модели* складывается из следующих этапов:

- 1) разработка математической модели [19–21];

2) разработка сеточной модели на основе параметров твердотельной модели и особенностей математической модели ([1, 11] и рекомендаций разработчика кода);

3) выбор схемы дискретизации [1, 11, 19];

4) выбор итерационного алгоритма решения полученной системы уравнений [22];

5) ввод исходных параметров (параметры рабочей среды, начальные и граничные условия и т.д.);

6) автоматизация процесса моделирования для сокращения трудозатрат (временных затрат) и снижения риска возникновения ошибок субъективного характера [17, 18].

Более подробно процесс создания компьютерных моделей описан в [22] и методических рекомендациях (methodology) к каждому программному продукту.

Валидация результатов моделирования — процесс определения того, насколько точно реализация математической модели передает ее концептуальное описание (концептуальную модель), представленное разработчиком. Процесс валидации представляет собой многоступенчатую отладку концептуальной 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. При этом для оценки величины ошибки при решении конкретной задачи необходимо решить следующие подзадачи [1, 11]:

1) обеспечение качества ввода исходных данных разработанной модели (исключение субъективных факторов) [17, 18];

2) исследование сходимости итерационной процедуры и оценка ошибок, связанных с выбором критериев итерационной сходимости;

3) оценка ошибок округления;

4) проверка выполнения балансовых соотношений, например баланса по массе, импульсу и энергии;

5) проверка сеточной сходимости;

6) проверка сходимости по времени;

7) оценка ошибок, связанных с выбором схем дискретизации по пространству и по времени;

8) выполнение процедур по определению и ограничению ошибок пользователя.

Более подробная информация об особенностях процесса валидации изложена в [1, 11]. После того как в процессе валидации ошибки дискретизации и итерационной сходимости достигают заданного значения, можно переходить к процессу верификации.

Верификация результатов численного моделирования — 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 данными, аналитическими данными или результатами моделирования рабочих процессов в рамках верифицированных программных комплексов). При этом процесс *моделирования рабочих процессов* в объекте исследования (который, как правило, имеет сложную пространственную конфигурацию и характеризуется большим количеством физических явлений) подразумевает следующие шаги:

- решение тестовых задач для верификации результатов моделирования отдельных физических явлений, характерных для рассматриваемой пневмогидравлической системы;
- решение тестовых задач для верификации результатов моделирования совокупности физических явлений;
- решение тестовых задач для верификации результатов моделирования в вариантах подсистем рассматриваемой системы;
- верификация компьютерной модели в полномасштабной пневмогидравлической системе (если возможно).

В рамках предложенного подхода верификация разработанной модели проводится на основе последовательного моделирования отдельных физических явлений на простой геометрической форме, которые затем постепенно усложняются и переносятся на более сложную геометрическую область. При этом процесс верификации напоминает процедуру аттестации кодов с составлением и заполнением матриц верификации. Подробнее этот процесс описан в работах [1, 11].

Основной сложностью для процесса верификации является получение экспериментальных данных, являющихся базой для оценки правильности результатов моделирования. Основные базы экспериментальных данных для ПГС представлены в [2]. Подробные инструкции по составлению и заполнению *матриц верификации* приведены в [23].

Разработка отчетной документации. При проведении численных исследований необходимо документальное подтверждение содержания и результатов любых теплогидравлических расчетов, особенно для верификационных и валидационных. Соответствующая информация должна быть записана, заархивирована и передана заказчику. Документация должна быть полной, последовательной и соответствовать требованиям нормативных документов предприятия. При проведении анализа теплогидравлических расчетов должны быть разработаны и документированы *требования к оформлению* подобной документации.

Разработка требований к документации представляет собой достаточно долгосрочный процесс. При оформлении качественных расчетов должны быть подробно документированы предположения, допущения, аппроксимации, упрощения, геометрические параметры расчетной области и источники исходных данных. Документальное обоснование CFD-расчетов должно быть организовано таким образом, чтобы сторонний эксперт мог четко оценить объем и качество проделанной работы. Уровень проработки требуемой документации может сильно зависеть от требований заказчика, изложенных в техническом задании.

Выводы. В основе предложенной методики проведения CFD-расчетов лежат международные рекомендации и многолетний опыт авторов в CFD-моделировании. На первый взгляд, многие из пунктов методики могут показаться очевидными или не влияющими на конечный результат моделирования процессов в ПГС. Однако, как показывает практика, пренебрежение любым из предложенных этапов может привести к ошибкам, которые становятся очевидными только на этапе верификации. Более того, в некоторых случаях необходимо расширение и углубление предложенной методики.

В то же время в большинстве случаев (например, при моделировании дозвуковых теплогидравлических процессов в однофазной постановке) применение настоящей методики позволяет получить достоверные результаты и определить требуемые параметры объекта исследования с необходимой точностью с приемлемыми временными затратами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications. *Nea/CSNI/R*, (2007)5, 154 p.
- [2] Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems. *Nea/CSNI/R*, (2007)13, 180 p.
- [3] Extension of CFD Codes Application to Two-Phase Flow Safety Problems (Phase 2). *Nea/CSNI/R*, (2007)13.
- [4] Menter F. CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications. *European Commission, 5th EURATOM Framework Programme, Report. EVOLECORA-D1*, 2002.
- [5] Casey M., Wintergerste T. Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD. *Best Practice Guidelines, Ver. 1. ERCOFTAC Report*, 2000.
- [6] Casey M., Wintergerste T. The best practice guidelines for CFD. A European initiative on quality and trust. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, v. 448, N. 1, 2002, pp. 1–10.
- [7] AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations. *AIAA Report*, G-077-1988, 1998.
- [8] Roache P.J. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Publishers, 1998.

- [9] Oberkampf W.L., Trucano T.G. Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, 2002, pp. 209–272.
- [10] Oberkampf W.L., Trucano T.G., Hirsch C. Verification, Validation and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics. *Applied Mechanics Reviews*, vol. 57, 2004, pp. 345–384.
- [11] *Computational fluid dynamics best practice guidelines for dry cask applications. Final report*. NUREG-2152. U.S. NRC, 2013, 117 p.
- [12] Сб. тезисов научно-технического семинара «Проблема верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике». Нижний Новгород, ОАО «ОКБМ Африкантова», 2012, 62 с.
- [13] Себиси Т., Бредшоу П. *Конвективный теплообмен*. Москва, Мир, 1987, 593 с.
- [14] Лойцянский Л.Г. *Механика жидкостей и газа* (7-е изд.). Москва, Дрофа, 2003, 840 с.
- [15] Гарбарук А.В., Стрелец Х.М., Шур Л.М. *Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений*. Санкт-Петербург, Наука и современность: Докл. международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2011, с. 260–264.
- [16] Патанкар С.В. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*. Москва, Энергоатомиздат, 1984, 152 с.
- [17] Флетчер К. *Вычислительные методы в динамике жидкостей*. Москва, Мир, 1991, т. 1, 504 с.
- [18] Флетчер К. *Вычислительные методы в динамике жидкостей*. Москва, Мир, 1991, т. 2, 552 с.
- [19] Versteeg H.K., Malalasekera W. An introduction to computational fluid Dynamics. *The Finite Volume Method*. England: Longman & Technical, 1995, 267 p.
- [20] Validation matrix for the assessment of thermal-hydraulic codes for VVER LOCA and transients. *A report by the OECD support group on the VVER thermal-hydraulic code validation matrix*. NEA/CSNI/R, (2001)4, 2001, 249 p.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Белова О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П., Николаева А.В., Крутиков А.А., Чернышев А.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/763.html>

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

Волков Василий Юрьевич родился в 1989 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2012 г. Инженер ОАО «ВНИИАЭС». Специализируется в области вычислительной газодинамики и тепломассообмена.

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

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.

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.

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