Многомасштабный подход к моделированию сложных переходных процессов движения жидкостей в технических системах

М.В. Крапошин, <m.kraposhin@ispras.ru>

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, Россия, Москва, ул. А. Солженицына, д. 25

Аннотация. В работе приводится описание многомасштабного подхода для моделирования процессов течений двухфазных сред в сложных технических системах. В основе многомасштабного подхода лежит как разделение расчетной области на подобласти с собственной системой уравнений, так и расщепление исходной системы уравнений на несколько подсистем для каждого из рассматриваемого масштабов. В качестве примера возможного применения многомасштабной модели рассматривается задача определения акустического шума в дальнем поле при старте ракеты-носителя с учетом подачи воды в газовые струи двигательной установки. Другими областями применения многомасштабной модели можно указать задачи нефтегазовой отрасли: глушение газодобывающих скважин, расположенных на большой глубине, глушение нефтяных скважин с высоким газовым фактором на месторождениях. Предлагаемая многомасштабная математическая модель включает в себя 5 подмоделей: 1) подмодель газодинамики высокоскоростных многокомпонентных течений смеси газов; 2) подмодель гидродинамики течения двухфазной смеси в гомогенном приближении с учетом сжимаемости газовой фазы и обмена массой между фазами; 3) подмодель переноса межфазной границы; 4) подмодель переноса облака капель и его взаимодействия с газожидкостной средой; 5) подмодель оценки шума в дальнем поле на основе акустической аналогии Ффоукс Вильямса-Хоукинга. Предложенная в рамках многомасштабного подхода модель может быть расширена для включения дополнительных моделей – таких, например, как Эйлерова-Лагранжева модель атомизации струй на основе уравнения эволюции плотности межфазной поверхности. Реализация подмоделей может быть выполнена на основе пакетов с открытым исходным кодом: OpenFOAM, Nektar++, ITHACA-FV. Подмодели акустики и гибридный алгоритм решения уравнений сжимаемой гомогенной двухфазной среды реализованы в виде модулей libAcoustics и hybridCentralSolvers на базе открытого пакета OpenFOAM. Использование платформы OpenFOAM в качестве базы для реализации программы позволяет получить архитектуру со взаимозаменяемыми элементами. Исходный код разрабатываемой модели свободно доступен через проект GitHub https://github.com/unicfdlab.

Ключевые слова: многомасштабные модели; численное моделирование; численные схемы; сжимаемые течения; многофазные течения; акустика; вычислительная гидро- аэро- и газодинамика; свободное программное обеспечение; метод контрольного объёма; разрывный метод Галёркина; libAcoustics; hybridCentralSolvers; OpenFOAM; Nektar++; Volume Of Fluid; Lagrangian Particle Tracking.

DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-15

Для цитирования: Крапошин М.В. Многомасштабный подход к моделированию сложных переходных процессов движения жидкостей в технических системах. Труды ИСП РАН, том 30, вып. 6, 2018 г., стр. 275-292. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-15

1. Список сокращений и обозначений

ELSA – Eulerian-Lagrangian Spray Atomization
LPT – Lagrangian Particle Tracking
NASA – National Aero Space Agency
PISO – Pressure Implicit With Splitting Operators
SIMPLE – Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
VOF – Volume-of-Fluid Method
PIMPLE – PISO/SIMPLE
КА – Космический Аппарат
ПО – Программное Обеспечение
ПУ – Пусковая Установка
РН – Ракета-Носитель
ТС – Техническая Система
УБИ – Уравнение Баланса Импульса
УСМ – Уравнение Сохранения Массы
УБЭ – Уравнение Баланса Энергии
УСС – Уравнение Состояния Среды
УПМП – Уравнение Переноса Межфазной Поверхности

2. Введение

Актуальность применения многомасштабных подходов к моделированию течений жидких сред в технических системах связана с возрастающим спросом со стороны промышленности на разработку так называемых цифровых двойников – программного обеспечения, имитирующего реальные изделия и позволяющего проводить компьютерную отработку и испытания технических устройств.

Разработка такого прикладного ПО сопряжена с необходимостью математического моделирования сложного движения двухфазных сред, объединяющих такие промышленных задачи как старт ракеты-носителя

класса, движение жидкости в технических системах космических аппаратов, унос грунта при посадке КА, процесс производства чугуна в доменных печах, глушение газовых и нефтяных скважин и пр. Эти задачи характеризуется крайней пространственной неоднородностью по числу Маха, многофазностью, «разбрызгиванием» водяных (жидких) струй, наличием физико-химических процессов, взаимодействием и отражением волн от элементов конструкции стартового комплекса РН, большими различиями в масштабах моделируемых элементов, фазовыми превращениями.

Многие из известных базовых моделей (том числе и реализованные в коммерческих зарубежных пакетах) используют допущения и методы, основанные на переносе отдельных частиц либо же многожидкостные подходы, которые удобны для моделирования отдельных явлений, но малопригодны для описания происходящих в указанных выше случаях сложных переходных процессов и образующихся разномасштабных структур.

В настоящее время рядом как российских, так и зарубежных коллективов ведутся работы по объединению различных подходов с целью расширения области использования моделей течений многофазных сред – например, модели, включающие в себя перенос межфазной границы и отдельных капель.

В работе предлагается гибридный, иерархический подход для решения актуальных промышленных задач. Такие подходы являются узкоспециализированными и в зависимости от постановки задачи должен корректироваться состав математической модели. Таким образом, поскольку сама модель не может рассматриваться в отрыве от прикладной задачи, то в данной работе в качестве примера применения взята задача исследования акустического шума при старте ракеты носителя.

3. Постановка прикладной задачи

В настоящее время одной из актуальных задач в ракетно-космической технике является снижение акустического шума от струй работающих двигателей. Для решения задачи снижения шума используются различные методы – пассивные и активные. Одним из таких методов является подача струй воды в зону газовой струи за срезом сопла двигателя ракеты-носителя (РН). Данная технология послужила предметом исследований, находящих свое отражение в ряде недавних статей авторов, представляющих ЦИАМ им. П.И. Баранова, ЦЭНКИ НИИСК, ФГУП ЦНИИМаш, NASA Glenn Research Center, NASA Marshall Space Flight Center.

Детальное изучение применимости этой технологии и сопутствующих газодинамических и акустических процессов в натурных условиях требует использования инструментов численного моделирования. Неоднородность области по числу Маха, многофазность, «разбрызгивание» водяных струй, наличие физико-химических процессов, взаимодействие и отражение волн от

элементов конструкции стартового комплекса РКН, большие различия в масштабе моделируемых узлов – все эти особенности обуславливают необходимость разработки гибридной модели газодинамическо-акустического решателя, способной корректно воспроизводить и прогнозировать данные явления при изменении конструкторской документации.

Анализ акустики дальнего поля (в области полезного груза) при старте ракеты-носителя сопряжен с анализом явлений существенно различных масштабов:

- многофазные течения в области подачи воды под соплами двигательной установки (ДУ);
- распространение газокапельной смеси в газоходе;
- турбулентное движение трансзвуковой струи на выходе из газохода;
- излучение звуковых волн;
- перенос (распространение) акустических колебаний в сторону носовой части ракеты-носителя.

Объем пространства моделирования определяется габаритами стартового стола и сооружений, составляющими порядка сотни метров по каждому направлению, в то время как характерный размер расчетной сетки по пространству может составлять около 0,01 м. Таким образом, число неизвестных в задаче будет составлять величину порядка 10^{12} ...10^{13}, что делает предъявляемые требования к вычислительным мощностям невыполнимыми в обозримом будущем. Для воспроизведения же капельного потока средствами VOF метода (как одного из наиболее частого используемого и надёжного) потребуются ещё более мелкие сетки, поскольку для разрешения капель необходимо порядка 10 ячеек на диаметр, а характерный размер капли, в зависимости от состава жидкости – 0.1 – 1 мм.

Решение такой задачи требует совместного применения разномасштабных моделей, каждая из которых будет действовать в своей подобласти, получаемой разделением области моделирования на подобласти (рис. 1). С другой стороны, для согласованного учета распространения капель в сверхзвуковом потоке понадобится расщепить описание газокапельного потока на две системы, действительные для своих масштабов: континуальную и дискретную (описываемую в переменных Лагранжа).

Расчётная область (геометрическая модель) газодинамики и акустики старта РН с учетом водоподачи включает стартовое сооружение (ПУ), РН и патрубки системы подачи воды и в соответствии с принятыми допущениями разбивается на три подобласти:

a) взаимодействия сверхзвуковых газовых струй с водяными струями;
b) турбулентного до- и транс- звукового течения струй горячего сжимаемого совершенного газа;

c) распространения акустических колебаний в воздухе (дальнее поле).

Подобласть a) включает в себя пространство внутри газохода от среза сопел РН до выходного сечения. Для корректного разрешения взаимодействия газовых и капельных струй необходимо совместное использование моделей на основе континуального и Лагранжева подхода. Пульсации газодинамических параметров на выходном срезе газохода являются исходными данными для подобласти b). При взаимодействии потока продуктов сгорания и струй воды, догорание компонентов смеси и конденсация не учитываются.

Подобласть b) включает открытую часть ПУ от выходного сечения ПУ вниз по потоку на расстоянии приблизительно 20-30 диаметров сопла. Пульсации газодинамических параметров (давления, плотности и скорости) в данной подобласти используются для определения акустических нагрузок в дальнем поле (на поверхности РН).

Подобласть c) соответствует дальнему полю распространения акустических колебаний в равномерной невозмущённой среде и включает в себя поверхность РН с расположенными на ней микрофонами.

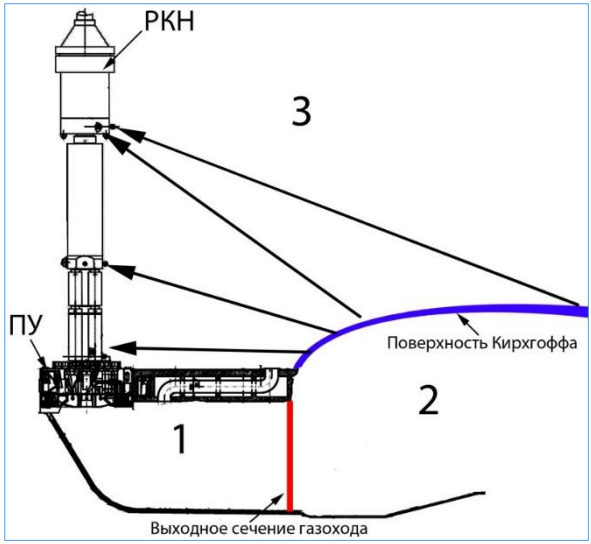

Рис. 1. Схема расположения подобластей расчетной области при моделировании старта РН

Fig. 1. Sketch of subregions introduced for accounting different phenomena during rocket lift-off

4. Математические модели

С учётом принятых допущений и описания расчетной схемы, математическая модель состоит из:

- в подобласти a) – трехмерных уравнений Навье-Стокса для турбулентных сверх-, транс- и дозвуковых течений сжимаемой газокапельной смеси, включая уравнения сохранения массы, импульса и энергии; переноса турбулентных величин, переноса компонент смеси, переноса капель, описание механизмов взаимодействия водяных и газовых потоков (испарение, обмен импульсом);
- в подобласти b) – трехмерных уравнений Навье-Стокса для турбулентных до- и трансзвуковых течений, включая уравнения сохранения массы, импульса и энергии; переноса турбулентных величин, переноса компонент смеси;
- в подобласти c) – интегрального решения уравнения Лайтхила, получаемого с помощью аналогии (уравнения) Фоукс Уильямс-Хокинга.

Кроме того, вместо решения уравнений Навье-Стокса в подообласти №2 и аналогии Фоукс Уильямс-Хокинга в подобласти c) возможно применение инженерно-эмпирического подхода, аналогичного разработанного в NASA для оценки шума от свободных струй [1-4]. Данный подход напрямую неприменим для рассматриваемой задачи, поскольку условия истечения струи существенно отличаются от исходных допущений автора.

Впоследствии точное разрешение процессов газодинамики и динамики капельного потока на основе многомасштабной модели может быть использовано для построения упрощённых инженерных подходов, аналогичных [1-4] или [7].

4.1. Модель газокапельной среды

В рассматриваемой задаче процессы обмена импульсом и внутренней энергией между водяными струями и газовым потоком исходящим из сопел ракеты-носителя являются определяющими при подавлении шума во время старта. Согласно [5-7] основной вклад в общее снижение энергии акустических пульсаций вносят именно механизмы:

- отбора кинетической и внутренней энергии от среднего потока каплями воды;
- интенсификации перемешивания в ядре струи, препятствующие развитию крупномасштабных вихревых структур (неустойчивостей) в слое смешения.

Скорость протекания процессов обмена импульсом и энергией между газовой и водяной фазами будет во многом определять мощность потока на выходе из

газохода, а также, следовательно, и уровень акустического шума в дальнем поле.

Согласно [8], в зависимости от коэффициента вязкости и поверхностного натяжения, диаметр самых маленьких капель, на которые разрывается струя на три порядка меньше характерного размера (например, диаметра струи) – таким образом, для насадок 0.1 – 1 м диаметр капель должен составлять порядка 0.1 – 1 мм. С учетом требований, предъявляемых современными численными моделями к сеточному разрешению [8], согласно которым на 1 диаметр капли должно приходиться от 8-12 ячеек, становится понятно, что прямое численное разрешение подобных течений не может быть применено в реальных приложениях. Более того, становится очевидно, что требования численного метода к пространственному разрешению для решения задачи эволюции межфазной поверхности отдельных капель являются более «вычислительно затратными» по сравнению с требованиями модели распространения акустических волн и газодинамики (см. подраздел 4.2).

В то же время, полностью отказаться от моделей на основе VOF не представляется возможным, поскольку:

- эти модели предъявляют наименьшие требования к вычислительным ресурсам по сравнению с многожидкостными или лагранжевым (LPT) подходами;
- в расчетной области могут присутствовать объёмы воды (водяной струи), сопоставимые по размерам с масштабами газовых струй.

Таким образом, разрабатываемая модель должна удовлетворять ряду критериев:

- не предъявлять существенно более высокие требования к вычислительным ресурсам по сравнению с моделью газодинамики;
- обеспечивать возможность переноса энергии и импульса в случаях, когда объёмная доля газа низкая (менее 1-5%, например) средствами моделей на основе LPT;
- поддерживать атомизацию (дробление струи) за счет взаимодействия с потоком газа;
- поддерживать взаимодействие капель с крупными объёмами жидкости, разрешаемыми с помощью модели VOF явно;
- осуществлять перенос импульса, энергии и массы из жидкой в газообразную фазу (фазы);
- учитывать сжимаемость газовой составляющей и движение со сверхзвуковыми скоростями;
- обеспечивать возможность учета многокомпонентной смеси;
- быть масштабируемой и расширяемой.

Количество частиц может быть весьма значительным, расстояния между ними могут достаточно малыми, а дисперсионный состав облака разнообразный,

что может сделать модель крайне сложной (столкновения, слипания, образование вторичных брызг, воздействие с помощью спутного следа и пр). В этом случае интерес представляют модели смеси на основе эволюции объёмной плотности межфазной поверхности [9], которая были специально разработана для больших значений чисел Re и We. Тем не менее в рассматриваемом случае применение этой модели сопряжено со значительными затруднениями:

- имеется большое количество эмпирических соотношений, которой необходимо верифицировать для случая подачи водяных струй в сверхзвуковые струи газа;
- в исходной модели предполагаются дозвуковые струи потока, что говорит о необходимости доработки для совместного решения с учетом баланса энергии потока.

В данной работе за основу взята модель, соединяющая подходы VOF и LPT [8, 10] и модель сжимаемого течения на основе схемы Курганова-Тадмора и алгоритма PIMPLE [11]. При этом в дальнейшем она может быть расширена для совместного использования с многожидкостными моделями или моделью на основе ELSA [9].

В основе предлагаемой многомасштабной модели лежит техника переноса маркера жидкости (объёмной доли жидкости) для определения положения межфазной границы с помощью балансного уравнения:

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{U}\, \alpha_l\right) - (\alpha_l + K_C)\nabla \cdot \left(\vec{U}\right) = \dot{v}_l\,, \tag{1}$$

где α_l – объёмная доля жидкости, $\vec{U}$ – среднемассовое поле скорости газожидкостной смеси, $\dot{v}_l$ – источник или сток объёма жидкости в континуальной системе, либо в капельную систему, K_C – коэффициент сжимаемости двухфазной смеси, определяемый в соответствии с [12, 13]:

$$K_C = \frac{\rho_{gm} c_{gm}^2 - \rho_l c_l^2}{\frac{\rho_{gm} c_{gm}^2}{\alpha_{gm}} + \frac{\rho_l c_l^2}{\alpha_l}}, \tag{2}$$

где индекс gm соответствуют смеси газов, индекс l – жидкости, ρ – истинная (термодинамическая) плотность жидкой или газообразной фазы, c – скорость звука жидкой или газообразной фазы, α_{gm} – объёмная доля смеси газов (газовой фазы).

Источниковое слагаемое $\dot{v}_l$ состоит из двух частей (3): $\dot{m}_d$ - переход массы жидкости из континуального описания в переменные Лагранжа (в систему капель) и обратно и $\dot{m}_v$ – объёмное вскипание.

$$\dot{v}_l = \frac{1}{\rho_l}\dot{m}_d + \frac{1}{\rho_l}\,\dot{m}_v\,. \tag{3}$$

В случае образования структур жидкой фазы, размеры которых меньше сеточного масштаба или сеточное разрешение не позволяет воспроизводить их с достаточным качеством (например, менее 7 ячеек на диаметр), эти структуры переводятся в описание в переменных Лагранжа (добавляются к облаку частицам) с помощью слагаемого $\dot{m}_d$. Если же частицы сталкиваются с жидкостью, то они «переводятся» в континуальное описание жидкой фазы с помощью слагаемого $\dot{m}_d$. Подробно этот подход описан в работах [8, 10]. Согласно (3) жидкость может как испаряться с поверхности капель, так и вскипать в объёме и переходить в газообразное состояние.

Движение капель описывается с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений, составленных для каждой из капель (или кластера капель), и включающая в себя уравнения движения центра масс капель, баланса масс капель, баланса импульса капель и баланса энергии капель.

Предполагается, что газожидкостная система, описываемая континуальным подходом, находится в механическом и термодинамическом равновесии и тогда можно записать уравнения баланса массы, энергии (полной энтальпии) и импульса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{U}\,\rho\right) = \dot{m}_d\,, \tag{4}$$

$$\frac{\partial \rho h^{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{U}\,\rho h^{tot}\right) - \frac{\partial p}{\partial t} - \sum_i \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i\, h_i) = -\nabla \cdot \vec{q} + \dot{m}_d e_d + \nabla \cdot \left(\hat{\Pi} \cdot \vec{U}\right), \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{U}\,\rho \otimes \vec{U}\right) = \dot{m}_d \vec{U}_d - \nabla p + \nabla \cdot \left(\hat{\Pi}\right), \tag{6}$$

где $h^{tot} = h + \frac{1}{2}\vec{U} \cdot \vec{U}$ – удельная полная энтальпия смеси, $h = u + p/\rho$ – удельная энтальпия смеси, u – удельная внутренняя энергия смеси. Удельная энтальпия смеси является взвешенной суммой энтальпий её составляющих: $h = Y_l h_l + Y_v h_v + Y_g h_g + Y_a h_a$, p – статическое давление в смеси, $\hat{\Pi}$ – тензор вязких напряжений в смеси, e_d – удельная полная энергия капель перешедших в/из континуальное состояние, $\vec{U}_d$ – скорость капель перешедших в/из континуальное состояние, Y_i – массовая доля компоненты газожидкостной смеси, h_i – удельная энтальпия компоненты газожидкостной смеси, D_i – коэффициент диффузии компоненты газожидкостной смеси, $\vec{q}$ – вектор теплового потока.

Тензор вязких напряжений $\hat{\Pi}$ с учетом гипотезы Стокса имеет вид:

$$\hat{\Pi} = \mu\left(\nabla\vec{U} + \left(\nabla\vec{U}\right)^T\right) - \frac{2}{3}\mu I \nabla \cdot \vec{U}\,, \tag{7}$$

где μ – коэффициент динамической вязкости смеси рассчитываемый по таблицам свойств среды в зависимости от температуры и состава смеси, I – единичный тензор.

Вектор теплового потока вычисляется в соответствии с законом Фурье:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \,, \tag{8}$$

где λ – коэффициент теплопроводности смеси рассчитываемый по таблицам свойств среды в зависимости от температуры и состава смеси.

Система дополняется уравнениями баланса массы компонент газовой смеси в диффузионном приближении для учета взаимного движения компонентов:

$$\frac{\partial \rho Y_a}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{U}\, \rho\, Y_a\right) - \nabla \cdot (\rho\, D_a \nabla Y_a) = 0 \,. \tag{9}$$

$$\frac{\partial \rho Y_g}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{U}\, \rho\, Y_g\right) - \nabla \cdot \left(\rho\, D_g \nabla Y_g\right) = 0 \,. \tag{10}$$

$$\frac{\partial \rho Y_v}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\vec{U}\, \rho\, Y_v\right) - \nabla \cdot (\rho\, D_v \nabla Y_v) = \dot{m}_v + \dot{m}_{dv} \,, \tag{11}$$

где $\dot{m}_{dv}$ – источник пара за счет испарения с поверхности капель.

Коэффициенты диффузионного переноса зависят от состава среды (равны нулю для случая соседства с жидкой фазой), и рассчитываются, например с использованием бинарных коэффициентов. Плотность среды ρ вычисляется через массовые доли и истинные плотности компонент:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{Y_l}{\rho_l} + \frac{Y_v}{\rho_v} + \frac{Y_a}{\rho_a} + \frac{Y_g}{\rho_g}. \tag{12}$$

Плотность жидкости ρ_l вычисляется с использованием линейного уравнения состояния: $\rho_l = \rho_{l0} + \psi_l(p - p_{l0})$, где ρ_{l0} и p_{l0} – референсные значения плотности и давления, ψ_l – коэффициент сжимаемости жидкости. Плотности пара, воздуха и продуктов сгорания ρ_v , ρ_a , ρ_g вычисляются в соответствии с уравнением совершенного газа и законом Дальтона. Уравнения состояния компонент смеси в основные балансные уравнения (1) – (10) непосредственно не входят и, следовательно, принципиально возможно использование этой модели совместно с более точными способами термодинамического описания фаз.

При необходимости для замыкания модели турбулентности может использоваться метод крупных вихрей.

4.2. Модель газодинамики

Модель газодинамики многокомпонентного потока применяется в подобласти b) после выхода из газохода и включает в себя:

- уравнение сохранения массы смеси (4) без источников водяной фазы;
- уравнение баланса энергии (5);
- уравнение баланса импульса (6);
- уравнений переноса массовый концентраций газообразных компонент смеси воздуха, пара и продуктов сгорания (9) – (11);
- уравнений состояния совершенного газа для компонент смеси;
- замыкающих соотношений для вычисления вязких потоков внутренней энергии и импульса (7) и (8).

При необходимости для замыкания модели турбулентности может использоваться метод крупных вихрей. Для корректного разрешения масштабов, связанных с распространением акустических волн требуется сеточное разрешение от 10 ячеек (в случае высокоточных численных методов) до примерно 60-80 ячеек (в случае схемы второго порядка) на длину волны.

4.3. Модель акустики в дальнем поле

Для учета акустики в дальнем поле используется интегральная модель на основе решения уравнений аналогии Фоукс Вильямса-Хокинга в постановке Фарассат 1A [14] с учётом отложенного времени. Рассматривается распространение возмущений в воздушной среде при нормальных условиях.

5. Реализация модели

Реализуемая модель акустики старта ракеты носителя включает в себя последовательное выполнение трёх расчетных этапов (подмоделей):

- расчёт взаимодействия газовых и водяных струй в газоходе и накопление статистики по газодинамическим величинам (давление, температура, скорость) на выходном срезе газохода;
- расчёт с учётом накопленной на предыдущем этапе статистики выхода турбулентной многокомпонентной струи газа из газохода в область над плоскостью стартового стола и накопление статистики по газодинамическим величинам на контрольной поверхности Кирхгофа;
- определение акустического поля с использованием аналогии Фоукс Вильямса-Хокинга и накопленной на втором этапе статистики.

Для эффективной обработки статистических данных на границах областей возможно использование методов анализа данных, таких как POD [15], прототип реализации которых выполнен в открытой библиотеке ITHACA-FV [16, 17].

Модель распространения турбулентной сжимаемой смеси над стартовым столом может быть реализована с применением разрывного метода Галёркина, реализованного в открытой библиотеке Nektar++ [18,19]. Для реализации

модели акустики дальнего поля целесообразно адаптировать библиотеку libAcoustics [20], разрабатываемую в ИСП РАН.

Моделей и их открытых реализаций, которые бы полностью соответствовали процессам, происходящим при взаимодействии газовых струй с водяными струями во время старта ракеты-носителя, в настоящее время не существует. При этом можно утверждать, что в зрелой стадии разработки находятся следующие модели, описывающие различные стороны этого процесса:

- модель газодинамики продуктов сгорания и гомогенной газоводяной смеси на основе гибридной метода Курганова-Тадмора и алгоритма связи скорости и давления проекционного типа PIMPLE [11, 21-23];
- модель движения несжимаемой двухфазной смеси с разделом фаз и фазовыми превращениями [24, 25];
- модель движения облака частиц [26], модель движения и тепломассообмена распыленной водяной струи в горячей газовой среде [27].
- модель турбулентного течения на основе метода крупных вихрей, реализованная в пакете OpenFOAM;
- многомасштабная модель движения двухфазной струи с атомизацией на основе Эйлер-Лагранжевого описания [8, 10].

Таким образом, с использованием перечисленных разработок, реализация модели взаимодействия газовых и водяных струй в газоходе включает в себя алгоритм интегрирования уравнений газожидкостной смеси (1) – (12), под-модель переноса фронта воды, под-модель взаимодействия жидкой фазы из континуального представления с каплями, под-модель движения облака капель, под-модель испарения капель, под-модель вскипания объёма жидкости, под-модель турбулентного переноса на основе метода крупных вихрей. С учетом превалирования в данном списке реализаций подмоделей на основе пакета OpenFOAM, целесообразно осуществлять разработку на основе этой библиотеки.

Алгоритм интегрирования уравнений модели и принципиальная схема взаимодействия подмоделей представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что на каждом временном шаге моделируемого физического процесса можно выделить три основных этапа:

- перенос межфазной границы и облака капель;
- решение уравнений модели турбулентности;
- решение уравнений баланса массы, энергии и импульса газожидкостной смеси.

Последний этап строится в соответствии с алгоритмом, предложенным в [11].

6. Заключение

В настоящее время всё большую популярность набирает направление развития информационных технологий, связанное с разработкой цифровых двойников технических систем – специализированных программ для имитации происходящих в ТС процессов.

Рис. 2. Общий алгоритм интегрирования уравнений в модели взаимодействия газовых и водяных струй

Fig. 2. Multiscale model equations solution sequence and sub-models interaction diagram

К алгоритмам и программам, разрабатываемым в рамках данного направления, предъявляются требования, обусловленные особенностями эксплуатации такого программного обеспечения: точность, быстродействие, надёжность и мультифизичность. Последнее требование сопряжено с многосторонностью эксплуатируемой технической системы, выражающееся в

разнообразии протекающих в ней процессов характеризуемых большим разбросом масштабов определяющих физических величин.

В качестве примеров технических систем и происходящих в них процессов приведены выход газовой струи из газодобывающей скважины на дне океана, старт ракеты носителя, глушение скважин, эксплуатирующих пласты с высоким газовым фактором, процессы изготовления чугуна в доменных печах. Отмечено, что решение перечисленных задач невозможно без совместного и согласованного привлечения иерархии математических моделей разработанных для описания явлений различного масштаба.

На примере задачи исследования акустического шума при старте ракеты-носителя дано развёрнутое описание многомасштабной математической модели начального этапа подъёма ракеты, включающей использование:

- модели акустики дальнего поля на основе акустической аналогии Ффоукс Вильямса Хокинга;
- модели турбулентной газовой струи – источника шума, основанной на решении осреднённых по пространству уравнений Навье-Стокса, баланса энергии и переноса компонент смеси сжимаемых газов;
- модели взаимодействия сверхзвуковых газовых и дозвуковых водяных струй в газоходе с учётом: ударных волн, волн разрежения, контактных разрывов, движения крупномасштабных и маломасштабных (капель) элементов водяных струй, а также процессов фазовых превращений.

Предложенное описание происходящих при старте РН процессов включает в себя 5 математических моделей, позволяющих описывать пространственные масштабы от 100 мкм до 10 м, временные масштабы от 0.01 мс до нескольких секунд, плотности среды от 1 кг/м^3 до 1000 кг/м^3, скорости сред, соответствующие значениям числа Маха от 0.01 до 5-6.

Реализация таких комплексных алгоритмов может быть существенно упрощена за счет привлечениях библиотек на основе открытого исходного кода, таких как Nektar++, OpenFOAM, LIGGGHTS и др.

Список литературы

[1] C.K.W. Tam, K. Viswanathan, K.K. Ahuja, J. Panda. The sources of jet noise: experimental evidence. Journal of Fluid Mechanics, vol. 615, 2008, vp. 253-292.

[2] C.K.W. Tam. Theoretical aspects of supersonic jets noise. In Proc. of the First Annual High-Speed Research Workshop, Part 2, 1992, pp. 647-662.

[3] C.K.W. Tam, M. Golebiowsky, J.M. Seiner. On the two components of turbulent mixing noise from supersonic jets. In Proc. of the Aeroacoustics Conference, 1996.

[4] C.K.W. Tam, H. Shen, G. Raman. Screech tones of supersonic jets from beveled rectangular nozzles. AIAA Journal, vol. 35, issue 7, 1997, pp. 1119-1125.

[5] P. Rajput, S. Kumar. Jet noise reduction by downstream fluidic injection: effect of injection pressure ratio and number of injection ports. In Proc. of the 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.

[6] D.G. Crighton. Basic principles of aerodynamic noise generation. Progress in Aerospace Sciences, vol. 16, issue 1, 1975, pp 31-96.
[7] M. Kandula, B. Vu. On the scaling laws for jet noise in subsonic and supersonic flow. NASA Preprint No. KSC-2003-040, 2003.
[8] Y. Ling, S. Zaleski, R. Scardovelli. Multiscale simulation of atomization with small droplets represented by a Lagrangian point-particle model. International Journal of Multiphase Flow, Elsevier, vol. 76, 2015, pp. 122-143.
[9] J.M. Garcia-Oliver, J.M. Pastor, A. Pandal, N. Trask, E. Baldwin, D.P. Schmidt. Disel spray CFD simulations based on the Sigma-Y Eulerian atomization model. Atomization and Sprays, vol. 23, no. 1, 2003, pp. 71-95.
[10] J.L. Estivalezes, D. Zuzio, B. DiPierro. An improved multiscale Eulerian-Lagrangian method for simulation of atomization process. Computers & Fluids, vol. 176, 2018, pp. 285-301.
[11] M. Kraposhin, M. Banholzer, I. Marchevsky, M. Pfitzner. A hybrid pressure-based solver for nonideal single-phase fluid flows at all speeds. International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 88, issue 2, 2018, pp. 79-99.
[12] R. Saurel, O. Le. Metayer, J. Massoni, S. Gavrilyuk. Shock jump relations for multiphase mixtures with stiff mechanical relaxation. Shock Waves, vol. 16, issue 3, 2007, pp 209–232.
[13] F. Denner, C.-N. X., Xiao, B.G.M. van Wachem Pressure-based algorithm for compressible interfacial flows with acoustically-conservative interface discretization. Journal of Computational Physics, vol. 367, 2018, pp. 192-234.
[14] F. Farassat. Derivation of Formulation 1 and 1A of Farassat. NASA Report NASA/TM-2007-214853, March, 2007
[15] М. Калугин, В. Корчагова, М. Крапошин, И. Марчевский, В. Морева. Использование инструментов анализа больших данных при решении задач газовой динамики и акустики. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, том 78, №3, 2018.
[16] G. Stabile, S. Hijazi, A. Mola, S. Lorenzi, G. Rozza. POD-Galerkin reduced order methods for CFD using Finite Volume Discretisation: vortex shedding around a circular cylinder. Communications in Applied and Industrial Mathematics, vol. 8, no. 1, 2017, pp. 210-236.
[17] G. Stabile G. Rozza. Finite volume POD-Galerkin stabilised reduced order methods for the parametrised incompressible Navier-Stokes equations. Computers & Fluids, vol. 173, 2018, pp. 273-284
[18] C. D. Cantwell, D. Moxey, A. Comerford et al. Nektar++: An open-source spectral/hp element framework. Computer physics communications, vol. 192, 2015, pp. 205-219.
[19] Nektar++: spectral/hp element framework. Режим доступа: https://www.nektar.info/downloads/, дата обращения 12.12.2018.
[20] A. Epikhin, I. Evdokimov, M. Kraposhin, M. Kalugin, S. Strijhak. Development of a Dynamic Library for Computational Aeroacoustics Applications Using the OpenFOAM Open Source Package. Procedia Computer Science, vol. 66, 2015, pp. 150-157.
[21] M. Kraposhin, A. Bovtrikova, S. Strijhak. Adaptation of Kurganov-Tadmor Numerical Scheme for Applying in Combination with the PISO Method in Numerical Simulation of Flows in a Wide Range of Mach Numbers. Procedia Computer Science, vol. 66, 2015, pp. 43-52.

[22] М.В. Крапошин. Возможности гибридного метода аппроксимации конвективных потоков при моделировании течений сжимаемых сред. Труды ИСП РАН, том 28, вып. 3, 2016, стр. 267-326. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(3)-16.
[23] M. Kraposhin, V. Korchagova, S.Strizhak, J. Beilke, A. Al-Zoubi. Comparison of the performance of open-source and commercial CFD packages for simulating supersonic compressible jet flows. In Proc. of Ivannikov Memorial Workshop'2018, Erevan, 2018.
[24] S.S. Deshpande, L. Anumolu, M.F. Trujillo. Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. Computational Science & Discovery, vol. 56, 2012.
[25] J. Roenby, B.E. Larsen, H. Bredmose, H. Jasak. A new volume-of-fluid method in OpenFOAM. In Proc. of the 7th Internatinal Conference on Computational Methods in Marine Engineering, 2017
[26] OpenFOAM Lagrangian solvers. Режим доступа: https://www.openfoam.com/documentation/cpp-guide/html/group__grpLagrangianSolvers.html, дата обращения 12.12.2018.
[27] Цой А.С. Режимы и механизмы подавления пламени распылённой водой. Диссертация кандидата технических наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016, 177 стр.

Multiscale approach for simulation of complex transient processes of fluid flows in technical systems

M.V. Kraposhin <m.kraposhin@ispras.ru>

Ivannikov Institute for System Programming of Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, Solzhenitsyna str., 25

Annotation. The paper presents a multiscale approach for simulation of the two-phase flows processes in complex technical systems. The multiscale approach is based both on the division of the computational domain into subdomains with their own system of equations, as well as on the splitting of the initial system of equations into several subsystems each is valid to the corresponding scale under consideration. The problem of the far field acoustic noise calculation during the launch of a rocket vehicle is considered as an example of the possible use of a multiscale model. The case is studied with account to noise suppression due to water supply into the gas jets of the propulsion system. Other areas of application of the multiscale model include the cases of the oil and gas industry: killing gas-producing wells located at great depth, killing oil wells with a high gas factor at the fields. The proposed multi-scale mathematical model includes 5 sub-models: 1) gas dynamics of high-speed multicomponent gas mixture flows; 2) the hydrodynamics of a two-phase mixture flow in a homogeneous approximation with the account for the compressibility of the gas phase and the mass exchange between the phases; 3) the liquid-gas interface transport; 4) the transport of a cloud of droplets and its interaction with a gas-liquid medium; 5) noise calculation in the far field using the Ffowks Williams-Hawking acoustic analogy. The model can be extended to include additional sub-models, such as the Eulerian-Lagrange Jet Atomization. The implementation of the submodels can be done on the basis of open source packages: OpenFOAM, Nektar ++, ITHACA-FV. The acoustics library and the hybrid algorithm for compressible homogeneous two-phase flow are implemented as libAcoustics and hybridCentralSolvers modules based on the OpenFOAM open package. The source code of the developed model is freely available through the GiHub project https://github.com/unicfdlab.

Keywords: multiscale models; numerical simulation; numerical schemes; compressible flows; multiphase flows; acoustics; computational hydro- aero- and gas-dynamics; open source software; finite volume method; discontinuous Galerkin method; libAcoustics; hybridCentralSolvers; OpenFOAM; Nektar++; Volume Of Fluid; Lagrangian Particle Tracking

DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-15

For citation: Kraposhin M.V. Multiscale approach for simulation of complex transient processes of fluid flows in technical systems. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 30, issue 6, 2018, pp. 275-292 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-15

References

[1] C.K.W. Tam, K. Viswanathan, K.K. Ahuja, J. Panda. The sources of jet noise: experimental evidence. Journal of Fluid Mechanics, vol. 615, 2008, vp. 253-292.

[2] C.K.W. Tam. Theoretical aspects of supersonic jets noise. In Proc. of the First Annual High-Speed Research Workshop, Part 2, 1992, pp. 647-662.

[3] C.K.W. Tam, M. Golebiowsky, J.M. Seiner. On the two components of turbulent mixing noise from supersonic jets. In Proc. of the Aeroacoustics Conference, 1996.

[4] C.K.W. Tam, H. Shen, G. Raman. Screech tones of supersonic jets from beveled rectangular nozzles. AIAA Journal, vol. 35, issue 7, 1997, pp. 1119-1125.

[5] P. Rajput, S. Kumar. Jet noise reduction by downstream fluidic injection: effect of injection pressure ratio and number of injection ports. In Proc. of the 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.

[6] D.G. Crighton. Basic principles of aerodynamic noise generation. Progress in Aerospace Sciences, vol. 16, issue 1, 1975, pp 31-96.

[7] M. Kandula, B. Vu. On the scaling laws for jet noise in subsonic and supersonic flow. NASA Preprint No. KSC-2003-040, 2003.

[8] Y. Ling, S. Zaleski, R. Scardovelli. Multiscale simulation of atomization with small droplets represented by a Lagrangian point-particle model. International Journal of Multiphase Flow, Elsevier, vol. 76, 2015, pp. 122-143.

[9] J.M. Garcia-Oliver, J.M. Pastor, A. Pandal, N. Trask, E. Baldwin, D.P. Schmidt. Disel spray CFD simulations based on the Sigma-Y Eulerian atomization model. Atomization and Sprays, vol. 23, no. 1, 2003, pp. 71-95.

[10] J.L. Estivalezes, D. Zuzio, B. DiPierro. An improved multiscale Eulerian-Lagrangian method for simulation of atomization process. Computers & Fluids, vol. 176, 2018, pp. 285-301.

[11] M. Kraposhin, M. Banholzer, I. Marchevsky, M. Pfitzner. A hybrid pressure-based solver for nonideal single-phase fluid flows at all speeds. International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 88, issue 2, 2018, pp. 79-99.

[12] R. Saurel, O. Le. Metayer, J. Massoni, S. Gavrilyuk. Shock jump relations for multiphase mixtures with stiff mechanical relaxation. Shock Waves, vol. 16, issue 3, 2007, pp 209–232.

[13] F. Denner, C.-N. X., Xiao, B.G.M. van Wachem. Pressure-based algorithm for compressible interfacial flows with acoustically-conservative interface discretization. Journal of Computational Physics, vol. 367, 2018, pp. 192-234.

[14] F. Farassat. Derivation of Formulation 1 and 1A of Farassat. NASA Report NASA/TM-2007-214853, March, 2007

[15] M. Kalugin, V. Korchagova, M. Kraposhin, I. Marchevsky, V. Moreva. Using Big Analytics Tools in Performance of Gas Dynamics and Acoustics Tasks. Herald of the Bauman Moscow State Technical University, vol. 78, no. 3, 2018 (in Russian).

[16] G. Stabile, S. Hijazi, A. Mola, S. Lorenzi, G. Rozza. POD-Galerkin reduced order methods for CFD using Finite Volume Discretisation: vortex shedding around a circular cylinder. Communications in Applied and Industrial Mathematics, vol. 8, no. 1, 2017, pp. 210-236.

[17] G. Stabile G. Rozza. Finite volume POD-Galerkin stabilised reduced order methods for the parametrised incompressible Navier-Stokes equations. Computers & Fluids, vol. 173, 2018, pp. 273-284

[18] C. D. Cantwell, D. Moxey, A. Comerford et al. Nektar++: An open-source spectral/hp element framework. Computer physics communications, vol. 192, 2015, pp. 205-219.

[19] Nektar++: spectral/hp element framework. Available at: https://www.nektar.info/downloads/, accessed 12.12.2018.

[20] A. Epikhin, I. Evdokimov, M. Kraposhin, M. Kalugin, S. Strijhak. Development of a Dynamic Library for Computational Aeroacoustics Applications Using the OpenFOAM Open Source Package. Procedia Computer Science, vol. 66, 2015, pp. 150-157.

[21] M. Kraposhin, A. Bovtrikova, S. Strijhak. Adaptation of Kurganov-Tadmor Numerical Scheme for Applying in Combination with the PISO Method in Numerical Simulation of Flows in a Wide Range of Mach Numbers. Procedia Computer Science, vol. 66, 2015, pp. 43-52.

[22] M.V. Kraposhin. Study of capabilities of hybrid scheme for advection terms approximation in mathematical models of compressible flows. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 28, issue 3, 2016, pp. 267-326 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(3)-16.

[23] M. Kraposhin, V. Korchagova, S.Strizhak, J. Beilke, A. Al-Zoubi. Comparison of the performance of open-source and commercial CFD packages for simulating supersonic compressible jet flows. In Proc. of Ivannikov Memorial Workshop'2018, Erevan, 2018.

[24] S.S. Deshpande, L. Anumolu, M.F. Trujillo. Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. Computational Science & Discovery, vol. 56, 2012.

[25] J. Roenby, B.E. Larsen, H. Bredmose, H. Jasak. A new volume-of-fluid method in OpenFOAM. In Proc. of the 7th Internatinal Conference on Computational Methods in Marine Engineering, 2017

[26] OpenFOAM Lagrangian solvers. Available at: https://www.openfoam.com/documentation/cpp-guide/html/group__grpLagrangianSolvers.html, accessed 12.12.2018.

[27] Tsoy A.S. Regimes and mechanisms for suppressing flames from sprayed water. PhD Thesis, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2016, 177 p. (In Russian).