

DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.1.8

УДК 621.45.034.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ СЕТОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ

А.М. Сипатов¹, С.А. Карабасов², Л.Ю. Гомзиков³, Т.В. Абрамчук³, Г.Н. Семаков¹¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация²Университет им. Королевы Мэри, Лондон, Великобритания³ООО «НПО Энергия», Пермь, Российская Федерация

Распыл струи жидкости под воздействием воздуха имеет широкое применение во многих сферах практической деятельности. При конструировании и доводке устройств распыливания жидкости всё большее значение приобретает трехмерное численное моделирование, которое, тем не менее, нуждается в верификации. В работе представлены результаты численного моделирования с использованием адаптивных сеточных моделей. Рассмотрено два случая распада жидкой пленки: дробление цилиндрической струи жидкости под действием набегающего потока воздуха и распад жидкой пленки при столкновении двух струй. Выполнено сравнение с экспериментальными данными. Обе задачи позволяют исследовать такие физические аспекты, связанные с процессом распыливания, как влияние параметров воздушного потока и неустойчивость пленки при механическом воздействии. Изучена зависимость от вида расчетной сетки качества описания течения и дробления струи жидкости при использовании VOF (Volume of Fluid) подхода для моделирования второй фазы. Показано, что применение локальной динамической адаптации делает возможным достижение необходимой точности при определении границ жидкой пленки и размеров капель, получаемых при её дроблении, даже на сравнительно небольших для VOF подхода сеточных моделях. Отмечено, что на результатах расчета сказывается не только выбор алгоритма адаптации, но и тип начальной сеточной модели (регулярная гексаэдрическая сетка, нерегулярная изотропная тетраэдрическая сетка). Приведены параметры расчетов, при которых удалось достичь убедительного соответствия расчетных и экспериментальных данных. Показано, что реализация VOF подхода с динамическим измельчением сетки разрешает выполнять расчеты распада жидкости на капли с высокой точностью.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, VOF подход, адаптивное измельчение, характеристики аэрозоля, распад жидкой пленки, встречные потоки, распад струи

ATOMIZATION MODELLING USING ADAPTIVE MESH REFINEMENT MODELING LIQUID JET ATOMIZATION USING ADAPTIVE MESH REFINEMENT

A.M. Sipatov¹, S.A. Karabasov², L.Yu. Gomzikov³, T.V. Abramchuk³ and G.N. Semakov¹¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation²Queen Mary University of London, London, Great Britain³JSC "Energiya", Perm, Russian Federation

Atomization of liquid jets due to air flow has a wide range of practical applications. A three-dimensional numerical analysis becomes increasingly important for designing and design development of liquid spraying systems, yet it has to be verified. The results of numerical simulations obtained using adaptive mesh refinement are presented. Two cases are considered: dispersion of a cylindrical jet in a crossflow air and liquid film destruction due to impingement of two jets. A comparison with the available experimental data has been performed. The problems under study make it possible to investigate such physical mechanisms governing atomization as the effect of airflow parameters and the instability of liquid film under mechanical impact. The influence of the quality of a computational mesh on the accuracy of the flow description is examined using the VOF (Volume of Fluid) approach. It is shown that the adaptive mesh refinement assures determination of liquid film boundaries and droplet sizes with a satisfactory accuracy even on relatively small meshes. It has been found that not only the choice of an adaption algorithm has a sufficient influence on the simulation results, but also the type of an initial mesh (regular hexahedral or irregular isotropic tetrahedral). Calculation parameters are presented at which good agreement with the experimental data has been obtained. The VOF approach combined with an adaptive mesh refinement provides high accuracy computations of liquid jet atomization processes.

Key words: computational fluid dynamics, VOF approach, adaptive atomization, aerosol characteristics, liquid film atomization, jet-on-jet impingement, jet atomization

1. Введение

Доводка распыливающих устройств до требуемых характеристик осуществляется с использованием численных и экспериментальных методов. При этом детальное экспериментальное исследование процесса распыливания на реальных форсунках затруднено ввиду широкого диапазона размеров частиц и плотности засеивания потока воздуха частицами жидкости. Наиболее приемлемым является численное моделирование, которое в общем случае включает моделирование распада струй и пленок жидкости на сгустки, вторичного дробления сгустков на капли и дальнейшего переноса капель потоком воздуха. Отработка методики расчета процесса формирования и дробления топливной пленки при распыливании является первоочередной задачей при расчетной доводке форсунок. При этом в прикладных задачах, несмотря на постоянно совершенствующиеся вычислительные ресурсы, основной проблемой при выполнении расчетов распыла является необходимость обеспечения требуемой степени дискретизации

расчетных областей ввиду широкого диапазона пространственных масштабов, на которых происходит распыл. Например, при распыливании жидкого топлива пневматической форсункой газотурбинного двигателя размер капель может достигать нескольких микронов, в то время как размеры топливных каналов превышают их на несколько порядков. Использование равномерных сеток при описании распада жидкой пленки на множество капель различного размера требует корректного разрешения сеточной моделью границ раздела фаз, а это приводит к непомерно высоким вычислительным затратам. Применение локального измельчения сеток [1–3] помогает приблизиться к решению проблемы, поскольку позволяет обойтись менее детальными сетками. Но в этом случае встает вопрос влияния на результаты моделирования динамического изменения сеточной модели, связанного с характеристиками воздушно-капельного потока.

В работе приведены результаты отработки методики расчета процесса распада жидкости на капли на примере двух характерных модельных задач, отражающих некоторые физические аспекты, важные для процесса распыливания: воздействие параметров воздушного потока и неустойчивость жидкой пленки при механическом воздействии.

2. Описание объектов исследования

Распыл струи жидкости под действием набегающего потока воздуха (Рис. 1) [4] имеет широкое практическое применение во многих системах подачи топлива, а также в камерах сгорания современных авиационных двигателей. Подобный тип радиальной подачи в поперечный поток улучшает характеристики распыливания топлива, испарения образующегося аэрозоля и используется в богатых камерах сгорания, а также в камерах с быстрой подготовкой обедненных смесей или с предварительным смешением и испарением топливно-воздушной смеси [5].

Данная задача широко применяется для изучения процесса распада струи жидкости на капли. Детальные экспериментальные исследования процесса распада жидкой колонны выполнены в работах [6–8]. В результате определены стадии дробления жидкой колонны (Рис. 1). Задача также неоднократно решалась численно. Так, в работе [9] выполнено моделирование распада струи с помощью метода крупных вихрей (LES подхода). Рассмотрено влияние соотношения плотностей жидкости и воздуха на процесс дробления жидкой колонны при параметрах потока и геометрических размерах расчетной области, приведенных в таблице 1.

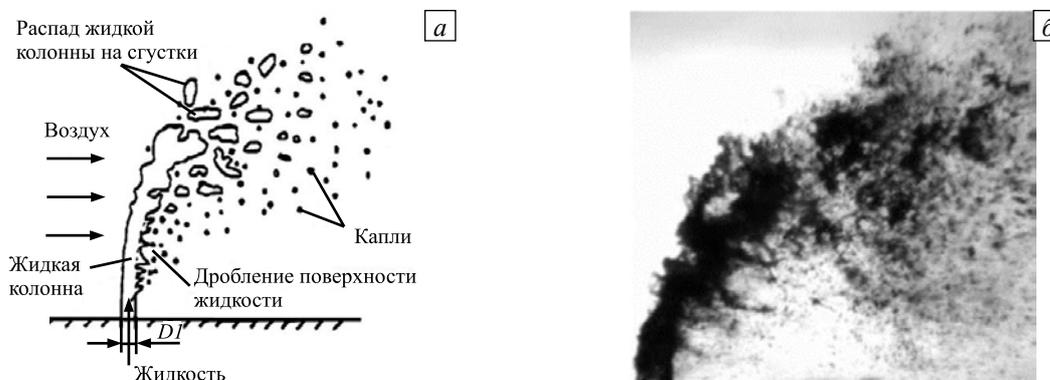


Рис. 1. Схема распада струи жидкости под воздействием набегающего потока (а); фотография распада струи жидкости (б)

Таблица 1. Параметры потоков, взятые при расчете в работе [9]

Параметр	Значение
Диаметр выходного отверстия, D_1 (мм)	1,3
Плотность набегающего потока воздуха, ρ_c (кг/м ³)	1,225
Плотность жидкости, ρ_j (кг/м ³)	1000
Скорость набегающего потока воздуха, u_c (м/с)	120,4
Скорость истекания жидкой струи, u_j (м/с)	10,83
Вязкость потока воздуха, μ_c (кг/мс)	$1,82 \cdot 10^{-5}$
Вязкость жидкости, μ_j (кг/мс)	$1,0 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент поверхностного натяжения, σ (Н/м)	0,07



Рис. 2. Иллюстрация распада пленки в задаче соударения двух струй

Вторая задача [10] — распад жидкой пленки, формируемой при столкновении двух струй, направленных под углом друг к другу (Рис. 2), также используется часто в качестве модельной. Жидкость подается через две расположенные под углом 2θ трубки круглого сечения в находящийся в состоянии покоя воздух. В работе [11] выполнено численное исследование процесса распада пленки, формирующейся при столкновении двух струй для различных чисел Вебера и Рейнольдса. Применялся VOF-подход (Volume of Fluid) с автоматическим измельчением ячеек сетки вблизи границы раздела фаз AMR (Adaptive Mesh Refinement).

В работе [12] распад пленки для различных режимов подачи и двух разных по свойствам жидкостей изучался экспериментально. Определены геометрические размеры образующегося лепестка жидкости и размеры капель.

На рисунке 2 показан процесс распада жидкой пленки в результате столкновения двух струй жидкости. Параметры потока и геометрические размеры отверстий приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры жидкости для расчета [12]

Параметр	Значение
Выходной диаметр отверстий, D_2 (мм)	0,5
Расстояние от кромки до точки столкновения струй, I (мм)	10,0
Плотность жидкости, ρ_j (кг/м ³)	998,9
Скорость истекания жидкой струи, u_j (м/с)	5,093
Вязкость жидкости, μ_j (мПа·с)	1,085
Угол между каналами, 2θ (градусы)	120
Коэффициент поверхностного натяжения, σ (мН/м)	73,21

Экспериментальное исследование касалось профиля границ пленки (параметров L и W) и размеров формируемых капель (см. Рис. 3а). На рисунке видно (см. Рис. 3б), что при формировании ровной поверхности пленки её геометрические размеры изменяются пропорционально расходу жидкости, но, начиная с некоторого критического значения (для давления 0,1 МПа — это расход 10^{-6} м³/с) поверхность становится неровной, а её размеры перестают линейно зависеть от расхода. Более того, она теряет односвязность, фактически становясь областью, где капли ещё не сформировались, но жидкость уже разделилась на отдельные сгустки — то есть это область первичного дробления.

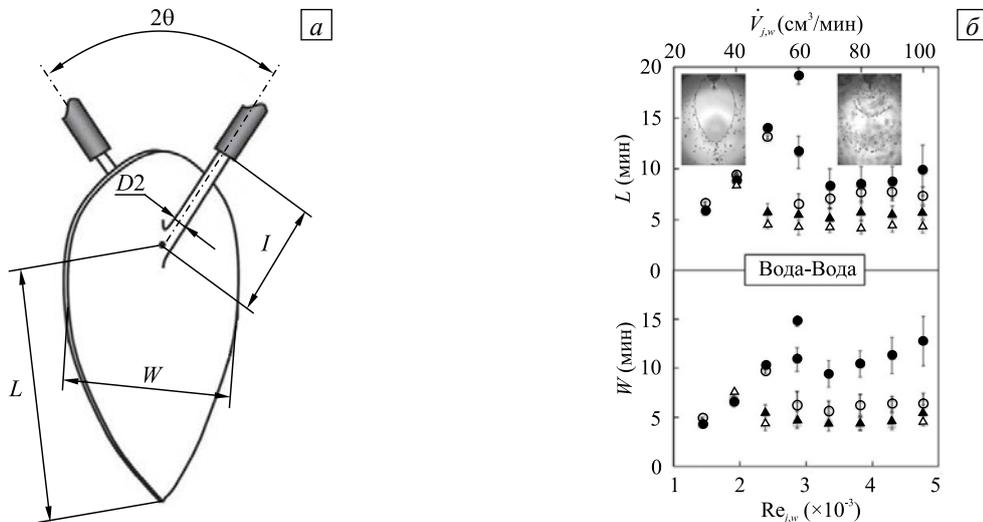


Рис. 3. Схема профиля границ пленки (а); распад жидкости при столкновении встречных струй (б) при разном объемном расходе $V_{j,w}$, соответствующих числах $Re_{j,w}$ и различных давлениях (МПа): 0,1 (черные точки); 1,1 (кружки); 2,3 (черные треугольники); 3,1 (треугольники)

3. Математическая постановка

Для расчетов использовался подход VOF [13], являющийся составной частью коммерческого программного продукта ANSYS Fluent [14]. Метод переноса объемной доли жидкости (VOF) основан на предположении существования четкой границы раздела фаз. В таком случае α (объемная доля воды) в различных точках пространства — величина дискретная и равняется 0 — в воздухе и 1 — в воде. А в ячейке объем жидкости определяется как $V_\alpha = \alpha V$, где V — объем ячейки.

Обычно двухфазное течение моделируется в явном виде двойным набором уравнений газовой динамики (для жидкости и газа), включающим уравнения неразрывности, количества движения, состояния и, в зависимости от постановки, энергии и турбулентности. Но при сравнительно небольших дозвуковых скоростях, то есть в условиях, когда воздух, как и жидкость, можно считать несжимаемым, все уравнения, следовательно, будут однотипными; потребность в двойном наборе переменных возникает только в ячейках, содержащих границу раздела фаз.

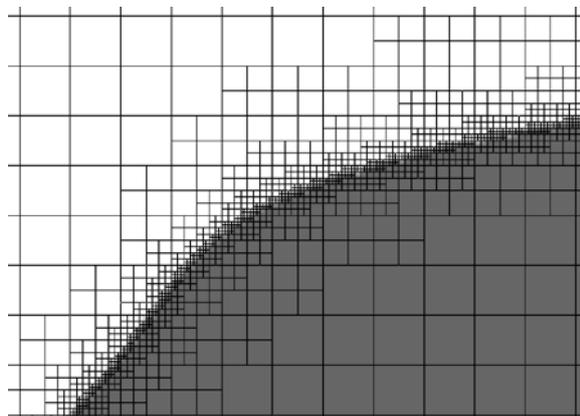


Рис. 4. Пример адаптации сетки вблизи границы раздела фаз

С учетом того, что планируется анализ возможности адаптации к градиенту концентрации жидкости (Рис. 4), границу раздела фаз будет присутствовать лишь в небольшой доле ячеек очень малого размера, в которых скорость жидкости и воздуха с допустимой погрешностью можно считать

равными. В таком случае достаточно ограничиться единственным набором уравнений, в котором уравнение неразрывности становится уравнением переноса объемной доли жидкости в ячейке α , а плотность находится как

$$\rho = \alpha \rho_{\text{ж}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{г}}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа.

С учетом (1) в уравнении сохранения количества движения межфазовое взаимодействие будет определяться силой поверхностного натяжения F :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \right] + \rho \mathbf{g} + F. \quad (2)$$

В (2) F задает градиент давления на поверхности раздела фаз через кривизну этой поверхности и находится через производные концентрации [15]:

$$F = \sigma \frac{\rho \nabla \alpha}{(1/2)(\rho_{\text{г}} + \rho_{\text{ж}})} \left(\frac{\nabla \cdot \nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right). \quad (3)$$

В (2) и (3) приняты обозначения: σ — коэффициент поверхностного натяжения, \mathbf{v} — вектор скорости, p — давление, μ — динамическая вязкость, \mathbf{g} — вектор гравитации.

Для оценки влияния вида сеточной модели на решение были проведены вычислительные эксперименты для различных вариантов расчетных сеток. Каждая сетка адаптировалась к границе раздела фаз подобно тому, как это показано на рисунке 4.

Метод состоит в измельчении каждой ячейки, в которой присутствует градиент объемной доли жидкости, имеющий значение выше некоторого выбранного критического уровня, на такие же ячейки, но вдвое меньших линейных размеров. В результате деления одной из ячеек, при условии отсутствия деления соседних ячеек, получается, что к концу любого ребра подходит два других ребра или, если сетка состоит из гексаэдров, к грани одного гексаэдра подходит четыре грани новых гексаэдров. Таким образом, появляется ряд узлов, для которых нет однозначно соответствующих узлов других ячеек. Значения искомых функций в этих узлах получаются интерполяцией, а для снижения ее ошибки накладывается дополнительное ограничение, что каждому ребру должны соответствовать не более двух ребер других ячеек. То есть, в случае необходимости измельчения уже разделенных ячеек дробить следует и соседние

ячейки, даже если в них нет критического градиента объемной доли жидкости. Напротив, если во всех новых ячейках, находящихся в пределах одной большой, градиент становится незначительным, они обратно объединяются, при этом также проверяется указанное дополнительно ограничение. Такой подход позволяет добиться достаточной точности определения границ жидкой пленки, так как становится возможным определение размеров капель, образующихся при её распаде, даже на сравнительно небольших для VOF подхода исходных сеточных моделях.

Существенное влияние на результаты расчета оказывает не только выбор алгоритма адаптации, но и тип начальной сеточной модели (регулярная гексаэдрическая сетка или нерегулярная изотропная тетраэдрическая сетка). Далее приведены параметры расчетов, при которых удалось достичь удовлетворительного соответствия расчетных и экспериментальных данных, и представлены расчетные области и примеры расчетных сеток для них: на рисунке 5 — для задачи распада жидкости под действием набегающего потока; на рисунке 6 — для задачи соударения двух струй.

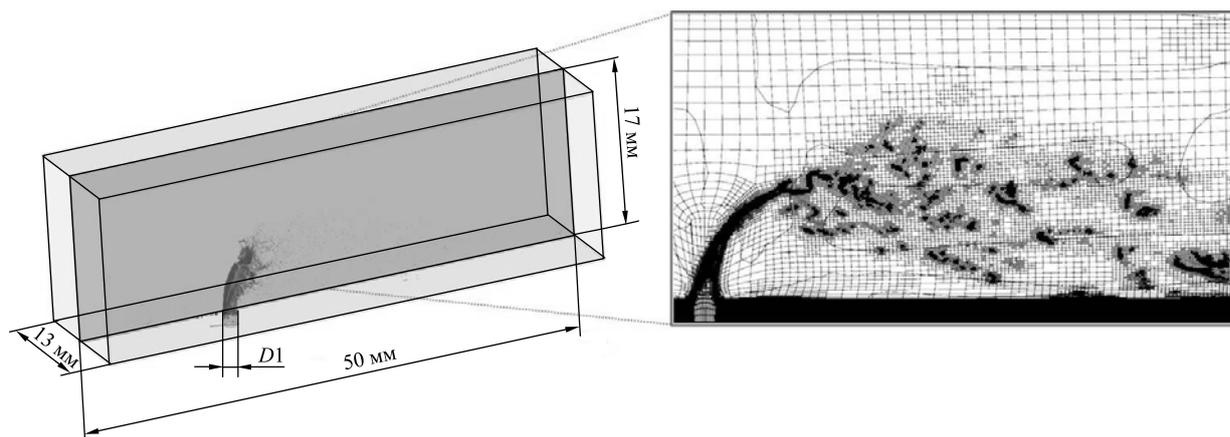


Рис. 5. Расчетная область и расчетная сетка для задачи распада жидкости под действием набегающего потока

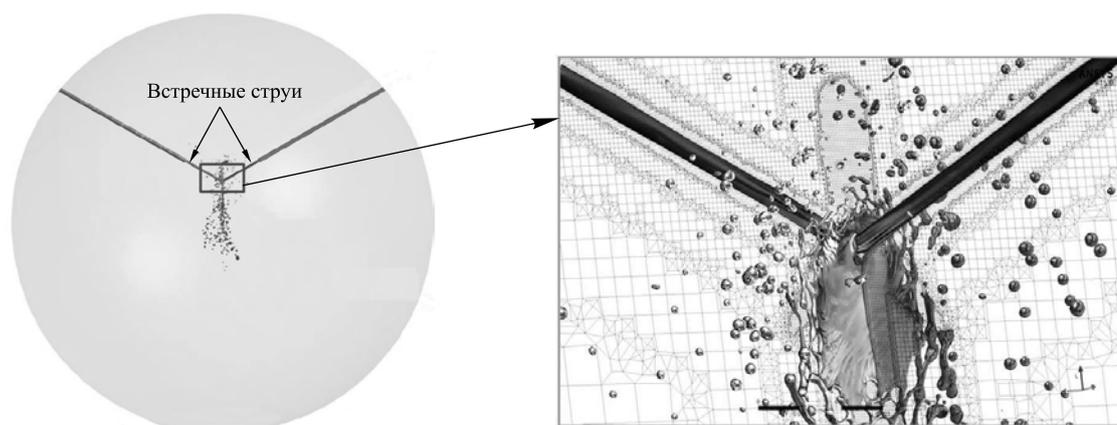


Рис. 6. Расчетная область и расчетная сетка для задачи распада жидкости при столкновении двух струй

4. Результаты численного моделирования

4.1. Задача дробления жидкой колонны под действием набегающего потока воздуха

Для проведения вычислительных экспериментов были построены тетраэдрическая и гексаэдрическая сетки с примерно равным линейным размером элементов — 0,1 мм («малые» сетки), а также гексаэдрическая сетка с размером элементов порядка 0,025 мм в области струи («большая» сетка с ячейками в 4 раза мельче). Причем на сетках 0,1 мм глубина измельчения задавалась равной 4, а на сетке 0,025 мм — равной 2, то есть окончательный минимальный размер ячейки на всех сетках был примерно одинаковым.

Расчеты выполнены без привлечения моделей турбулентности, то есть применялось прямое численное моделирование турбулентного течения (DNS — Direct Numerical Simulation). При таком подходе требования к размерам сеточной модели, достаточным для разрешения вихревой структуры течения, очень высоки и фактически они удовлетворялись только вблизи границы раздела фаз (при значительном измельчении). Таким образом, данный подход можно условно назвать «недоразрешенным DNS».

Выполнены три варианта расчета:

- а) недоразрешенное DNS, «большая» гексаэдрическая сетка;
- б) недоразрешенное DNS, «малая» тетраэдрическая сетка;
- в) недоразрешенное DNS, «малая» гексаэдрическая сетка.

На рисунке 7 представлены результаты моделирования распада жидкой струи под воздействием набегающего потока воздуха при различных вариантах сеток. Изображение поверхности объемной доли жидкости, которая составляет 0,5, установленное численно, наложено на фотографию эксперимента (см. слева): средняя линия (зеленая) и границы пульсаций струи (красные линии).

Для расчетов при всех вариантах сеток с использованием DNS с различной степенью разрешения видно, что под воздействием набегающего потока воздуха жидкая колонна деформируется, постепенно приобретая в сечении U-образную форму. Причем на обеих гексаэдрических сетках (Рис. 7а, в) картина разрушения пленки сопоставима и симметрична. Отличия, главным образом, наблюдаются в нижних сечениях струи и, по видимому, связаны с тем, что при аппроксимации окружности сетками разного типа получается различная точность отображения профиля. При измельчении сетки новые узлы не проецируются на геометрическую модель, таким образом, несмотря на уменьшение размера сеточных ячеек, отверстие остается многоугольником с количеством сторон (и, соответственно, углами в вершинах), зависящим от начального разбиения. В результате на «малой» сетке (Рис. 7б) углы многоугольника более острые и на них расчетный срыв капель происходит уже вблизи основания струи. Этим же стартовым распределением неоднородности объясняется и неровность внешней поверхности струи по сравнению с вариантом на рисунке 7а.

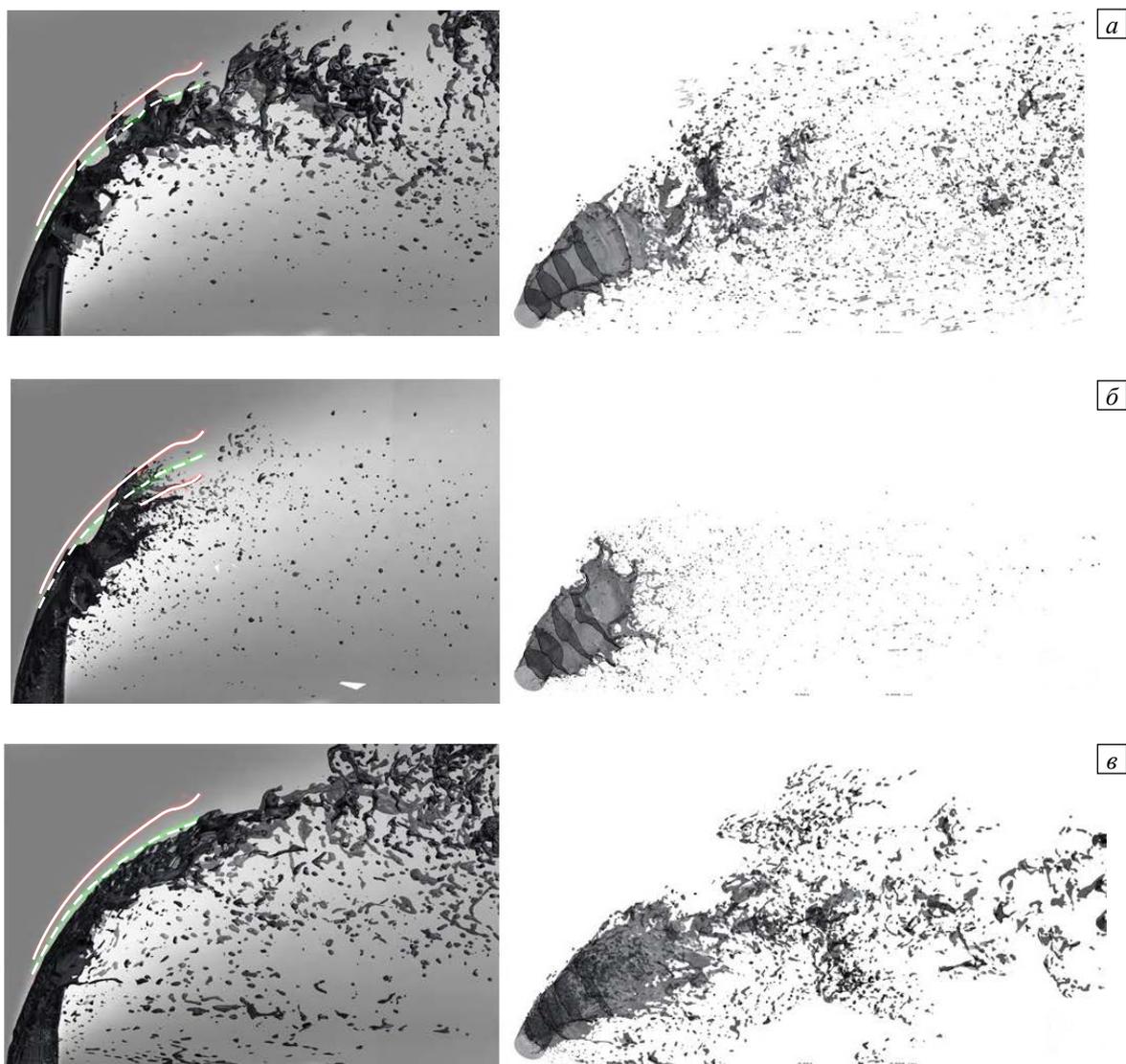


Рис. 7. Изображение поверхности объемной доли жидкости, составляющей 0,5, установленное численно, наложено на фотографию эксперимента: средняя линия (штриховая) и границы пульсаций струи (сплошные линии); «большая» гексаэдрическая сетка (а), «малая» тетраэдрическая сетка (б), «малая» гексаэдрическая сетка (в)

В варианте с тетраэдрами (Рис. 7б) колебания пленки жидкости асимметричны: пленка разрывается то слева, то справа от оси струи, причем распад происходит намного интенсивнее, струй и сгустков почти не наблюдается, пленка сразу разрывается на множество капель. Это объясняется тем, что сетка до появления градиента концентрации жидкости сохраняет исходное разбиение. При регулярных гексаэдрических сетках линии тока совпадают с сеточными линиями, и никакого дисбаланса в поток не вносится. В тетра-сетке сеточные направления изотропны, то есть поток постоянно проходит через сеточные линии разной направленности. В поток вносится «математическая» турбулентность, и воздух при взаимодействии со струей содержит множество локальных неоднородностей, что в купе с многогранником «малой» сетки в основании струи приводит к более интенсивному распаду потока.

4.2. Задача соударения двух струй

Для численного моделирования процесса соударения двух струй (на основе анализа результатов расчета влияния расчетной сетки на результат моделирования распыла) была построена неструктурированная гексаэдрическая сетка с заужением узлов в области предполагаемого формирования пленки (выделена на Рис. 6). В расчете устойчивой стабилизации пленки при столкновении струй добиться не удалось, хотя в эксперименте при заданном расходе (соответствовал $10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$) с равной вероятностью формировались либо пленка протяженностью $\sim 19 \text{ мм}$ от точки столкновения, либо колеблющаяся разорванная поверхность меньшей длины. При подключении моделей турбулентности в результате действия дополнительной схемной вязкости по границе формируемой пленки (в области низкой скорости движения потока) образовывался сгусток жидкости, приводящий либо к периодическому отрыву всей пленки (колебаниям по типу крыльев бабочки), либо к колебаниям пленки вне плоскости взаимодействия (Рис. 8).

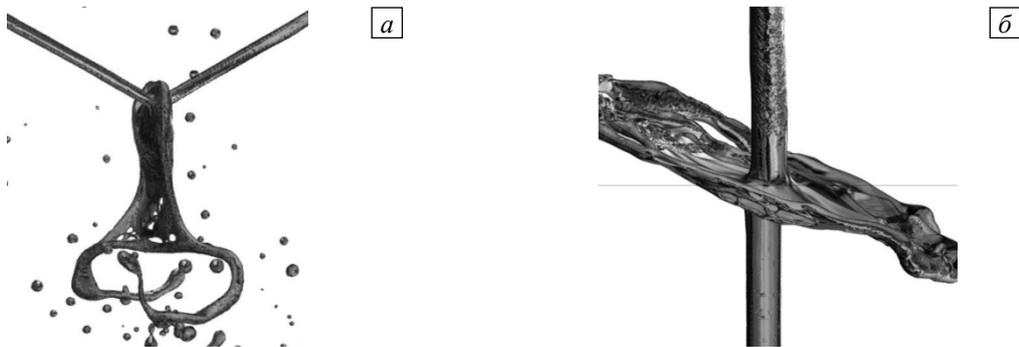


Рис. 8. Неосевые колебания пленки под действием схемной вязкости: сгусток пленки (а); колебания пленки вне плоскости взаимодействия (б)

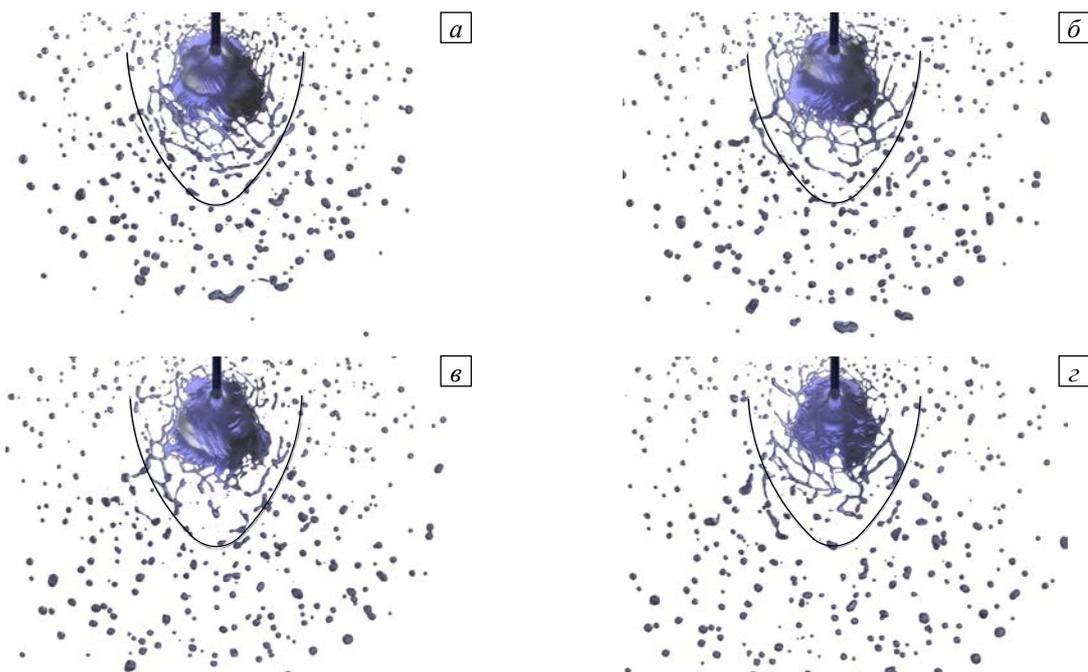


Рис. 9. Вид поверхности объемной доли жидкости, составляющей 0,5, в различные моменты времени t (с): 0,00560 (а); 0,00613 (б); 0,00640 (в); 0,00680 (г); показана линия среднего положения границы пленки, взятая из экспериментальных данных

При решении без использования моделей турбулентности при столкновении струй формируется поверхность, колеблющаяся с небольшой амплитудой — 2–3 мм. На рисунке 9 показана поверхность объемной доли жидкости и линия экспериментального положения границы пленки в различные моменты времени. Как видно из рисунка, сама поверхность не достигает пределов экспериментальной границы, но и в эксперименте при режиме колебаний пленка имела разрывы. В расчете же это фактическая граница, до которой жидкость присутствует в виде сгустков и пленок, а за её пределами — в виде отдельных капель.

Анализ размеров капель проводился следующим образом. При последовательном обходе условной опросной области находился элемент со значением объемной доли, большим $n = \{0,05; 0,1; 0,5; 0,9\}$, после делался обход всех примыкающих к нему элементов также со значением, большим n ; таким образом устанавливалась односвязная область из N элементов, условно включающая всю каплю. Далее по формуле

$$V_d = \sum_{i=1}^N V_i \alpha_i, \quad (4)$$

вычислялся объем капли. В (4) V_i — объем элемента, а α_i — объемная доля жидкости в нем.

Процедура повторялась до обхода всей опросной области. В результате получались значения диаметров всех капель в области, что давало возможность определить среднезаутеровский диаметр (согласно [5]):

$$D_{32} = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2}. \quad (5)$$

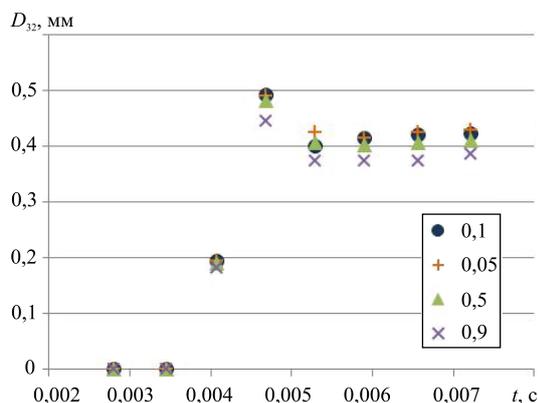


Рис. 10. Среднезаутеровский диаметр в зависимости от времени для различных значений объемной доли жидкости

Среднезаутеровский диаметр капель (5) в опросной области (ниже линии среднего положения границы пленки на рисунке 9) с течением времени изменяется. Как видно из рисунка 8, вначале появляются мелкие капли (след соударения струй), затем более крупные капли (след формирующегося после соударения кольца), а затем наступает стабилизация на среднем диаметре $\sim 0,39–0,43$ мм (в зависимости от объемной доли жидкости); в эксперименте средний диаметр равнялся $\sim 0,43–0,45$ мм. Необходимо отметить, что представленные значения среднезаутеровского диаметра капель (Рис. 10) с течением времени слабо зависят от различных значений объемной доли жидкости.

5. Заключение

Исследованы модельные задачи распада струи жидкости под воздействием набегающего потока воздуха и при столкновении двух струй, направленных под углом. Показано, что реализация VOF подхода с использованием адаптивного подсеточного моделирования позволяет выполнять расчеты распада жидкости на капли с высокой точностью. Достигнуто хорошее согласование численных и экспериментальных данных для траектории отклонения струи под воздействием потока воздуха. Для задачи соударения двух струй помимо качественного совпадения расчета с экспериментом получено хорошее согласование по среднему заутеровскому диаметру.

Продемонстрировано, что существенное влияние на моделирование оказывает расчетная сетка. Наилучшие результаты получены для более детальной гексаэдрической сетки с применением недоразрешенного DNS подхода.

В целом разработанный подход к моделированию процесса распада жидкой фракции позволяет применять его при описании распыления жидкого топлива в пневматических форсунках, а также для определения граничных условий для распределения топлива при постановке задач с учетом процессов горения.

Литература

1. Berger M.J., Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics // J. Comput. Phys. – 1989. – Vol. 82, no. 1. – P. 64-84. DOI
2. Kadioglu S.Y., Sussman M. Adaptive solution techniques for simulating underwater explosions and implosions // J. Comput. Phys. – 2008. – Vol. 227, no. 3. – P. 2083-2104. DOI

3. Almgren A.S., Bell J.B., Colella P., Howell L.H., Welcome M.L. A conservative adaptive projection method for the variable density incompressible Navier–Stokes equations // *J. Comput. Phys.* – 1998. – Vol. 142, no. 1. – P. 1-46. DOI
4. Brown C.T., McDonell V.G. Near field behavior of a liquid jet in a crossflow // *Proceedings of the ILASS Americas, 19th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2006.*
5. Lefebvre A.H. *Gas turbine combustion – Alternative fuels and emissions.* – New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010.
6. Wu P.-K., Miranda R.F., Faeth G.M. Effects of initial flow conditions on primary breakup of nonturbulent and turbulent round liquid jets // *Atomization Spray.* – 1995. – Vol. 5, no. 2. – P. 175-196. DOI
7. Wu P.-K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows // *J. Propul. Power.* – 1997. – Vol. 13, no. 1. – P. 64-73. DOI
8. Wu P.-K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows // *J. Propul. Power.* – 1998. – Vol. 14, no. 2. – P.173-182. DOI
9. Hautman D.J. Spray characterization of like-on-like doublet impinging rocket injectors // *27th AIAA ASME SAE ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA 1991-0687, 1991.*
10. Herrmann M., Arienti M., Soteriou M. The impact of density ratio on the primary atomization of a turbulent liquid jet in crossflow // *ASME Turbo Expo 2010, Glasgow, UK, June 14-18, 2010.* DOI
11. Chen X., Ma D., Yang V., Popinet S. High-fidelity simulations of impinging jet atomization // *Atomization Spray.* – 2013. – Vol. 23, no. 12. – P. 1079-1101. DOI
12. Yasuda N., Yamamura K., Mori Y.H. Impingement of liquid jets at atmospheric and elevated pressures: an observational study using paired water jets or water and methylcyclohexane jets // *Proc. R. Soc. A.* – 2010. – Vol. 466. – P. 3501-3526. DOI
13. Youngs D.L. *Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. Numerical methods for fluid dynamics* / Ed. by K.W. Morton, M.J. Baines. – New York: Academic Press, 1982.
14. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX release 14.5.
15. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // *J. Comput. Phys.* – 1992. – Vol. 100, no. 2. – P. 335-354. DOI

References

1. Berger M.J., Colella P. Local adaptive mesh refinement for shock hydrodynamics. *J. Comput. Phys.*, 1989, vol. 82, no. 1, pp. 64-84. DOI
2. Kadioglu S.Y., Sussman M. Adaptive solution techniques for simulating underwater explosions and implosions. *J. Comput. Phys.*, 2008, vol. 227, no. 3, pp. 2083-2104. DOI
3. Almgren A.S., Bell J.B., Colella P., Howell L.H., Welcome M.L. A conservative adaptive projection method for the variable density incompressible Navier–Stokes equations. *J. Comput. Phys.*, 1998, vol. 142, no. 1, pp. 1-46. DOI
4. Brown C.T., McDonell V.G. Near field behavior of a liquid jet in a crossflow. *Proceedings of the ILASS Americas, 19th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2006.*
5. Lefebvre A.H. *Gas turbine combustion – Alternative fuels and emissions.* New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010.
6. Wu P.K., Miranda R.F., Faeth G.M. Effects of initial flow conditions on primary breakup of nonturbulent and turbulent round liquid jets. *Atomization Spray.*, 1995, vol. 5, no. 2, pp. 175-196. DOI
7. Wu P.-K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S. Breakup processes of liquid jets in subsonic crossflows. *J. Propul. Power*, 1997, vol. 13, no. 1, pp. 64-73. DOI
8. Wu P.K., Kirkendall K.A., Fuller R.P., Nejad A.S. Spray structures of liquid jets atomized in subsonic crossflows. *J. Propul. Power*, 1998, vol. 14, no. 2, pp.173-182. DOI
9. Hautman D.J. Spray characterization of like-on-like doublet impinging rocket injectors. *27th AIAA ASME SAE ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA 1991-0687, 1991.*
10. Herrmann M., Arienti M., Soteriou M. The impact of density ratio on the primary atomization of a turbulent liquid jet in crossflow. *ASME Turbo Expo 2010, Glasgow, UK, June 14-18, 2010.* DOI
11. Chen X., Ma D., Yang V., Popinet S. High-fidelity simulations of impinging jet atomization. *Atomization Spray.*, 2013, vol. 23, no. 12, pp. 1079-1101. DOI
12. Yasuda N., Yamamura K., Mori Y.H. Impingement of liquid jets at atmospheric and elevated pressures: an observational study using paired water jets or water and methylcyclohexane jets // *Proc. R. Soc. A.*, 2010, vol. 466, pp. 3501-3526. DOI
13. Youngs D.L. *Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. Numerical methods for fluid dynamics*, ed. by K.W. Morton, M.J. Baines. New York: Academic Press, 1982.
14. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX release 14.5.
15. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *J. Comput. Phys.*, 1992, vol. 100, no. 2, pp. 335-354. DOI

Поступила в редакцию 11.02.2015; опубликована в электронном виде 31.03.2015

Сведения об авторах

Сипатов Алексей Матвеевич, д-р, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, Пермь, Комсомольский просп., д. 29; e-mail: sipatov@avid.ru

Карабасов Сергей Александрович, д-р, Queen Mary, University of London, Mile End Road, London, E1 4NS, UK; e-mail: sak36@hermes.cam.ac.uk

Гомзиков Леонид Юльевич, ООО «НПО Энергия», 614000, Пермь, Комсомольский просп., д. 29; e-mail: gomzikov@avid.ru

Абрамчук Тарас Викторович, ООО «НПО Энергия»; e-mail: abramchuk-tv@avid.ru

Семаков Глеб Николаевич, асп., ПНИПУ; e-mail: semakov@avid.ru