

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА СТРУЙ, ФОРМИРУЕМЫХ ФОРСУНКАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПК FLOWVISION

В.С. Акимов^{1,а}, инженер, Г.Ю. Бартенев¹, инженер-разработчик
¹ ООО «ТЕСИС», ул. Юннатов, д.18, оф. 705, Москва, Россия

В данной работе продемонстрирована возможность моделирования распада струи в ПК FlowVision на примере задачи впрыскивания топлива форсункой клапанного типа. Предложены инструменты, позволяющие оптимизировать постановку задачи и анализ результатов. Проведены сравнения результатов с экспериментальными данными и эмпирической зависимостью.

Работа выполнена при поддержке Курчатовского центра обработки данных.

Введение

Наиболее широко форсунки используются в двигателестроении. Процессы смесеобразования в двигателях всегда имеют определяющее значение в организации их работы. Одним из самых важных этапов в смесеобразовании является организация впрыскивания и распыливания топлива. Во многом именно качество распыливания топлива определяет показатели токсичности и эффективности двигателей. Требования к организации наиболее качественного распыливания топлива растут из года в год: с одной стороны формируемые форсункой струи должны обеспечивать наилучшую равномерность распределения топлива, наименьшие диаметры капель, с другой стороны необходимо обеспечить приемлемую дальнобойность, чтобы избежать образования большого количества несгоревших углеводородов при испарении топлива со стенок. Очень актуальна проблема качественного распыливания топлива для судовых ДВС, где экономия нескольких мг/кВт*ч выливается в итоге в огромную экономию денежных средств.

Кроме двигателестроения, форсунки и распылители различного типа широко используются и в других отраслях промышленности, а так же в быту. Одним из наиболее широких видов применения является использование распылителей для охлаждения нагретых поверхностей деталей машин и станков. При этом на теплообмен значительное влияние оказывают характеристики распределения диаметров капель, толщина жидкостной пленки и свойства распыливаемой жидкости. Помимо экспериментальных методов спектр задач, обозначенных выше, может так же успешно решаться и численными методами.

Методы моделирования формирования и продвижения струй

Традиционно в России в вопросах моделирования формирования струи в двигателях обращаются к полуэмпирическим зависимостям для дальнобойности топливного факела и среднего диаметра капель. Наиболее распространены зависимости, полученные А.С. Лышевским [1]. Данные зависимости разработаны для конкретных случаев и имеют достаточно ограниченную область применения. Кроме того, в современных условиях, ведущие производители двигателей переходят к расчетам процессов смесеобразования и сгорания методами вычислительной гидро-газодинамики. В таком случае более современным и практически более целесообразным оказывается моделирование формирования струй так же методами CFD (Computational Fluid Dynamics).

Для моделирования процессов формирования струи методами CFD используются два подхода. Первый из них - прямое моделирование распада струи подразумевает применение модели Volume of fluid (VOF) и разрешение расчетной сеткой всего диапазона интересующих размеров капель [1], рис.1. Часто данный подход используют только для расчета первичного распада струи из-за высоких требований к вычислительным ресурсам.

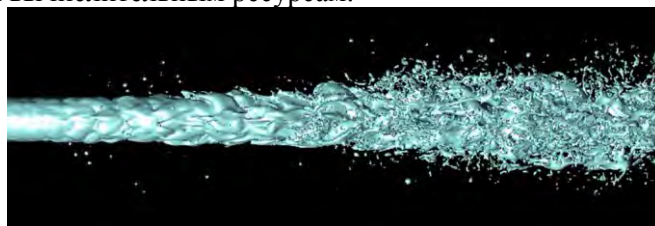


Рис.1 - Прямое моделирование первичного распада струи [2]

Второй подход состоит в задании начальных скоростей и распределения капель, исходя из экспериментальных данных, полуэмпирических моделей первичного распада или из результатов расчетов первичного распада струи. При этом дальнейшее продвижение дисперсных капель, их взаимодействие со сплошной средой считается с использованием модели дисперсной фазы, не

требующей таких больших ресурсов, как метод прямого моделирования. Возможно также использование гибридного подхода: методом прямого моделирования распада струи определяются характерные размеры капель и их скорости в результате первичного распада струи, а дальнейшее движение капель, размеры которых уже не могут быть разрешены расчетной сеткой, моделируются в подходе дисперсной фазы. Стоит отметить, что этот переход обычно связан с заменой расчетной области и набора моделей. Кроме того, необходимо организовать сбор необходимых данных по результатам первичного распада: сбор статистики по размерам капель, определение наиболее вероятного диаметра в распределении Розина-Рамлера. Все эти операции сопряжены с рядом допущений при осреднении, а так же со значительными сложностями и затратами времени. Кроме того, зачастую реализация модели Volume of Fluid (VOF) в CFD-пакетах сопряжены с рядом проблем, таких как значительные потери массы, значительное «размазывание» границы раздела фаз при недостаточном разрешении расчетной сеткой.

Особенности модели Volume of Fluid в ПК FlowVision

Для моделирования распада струи в данной работе была использована модель VOF в программном комплексе FlowVision. Особенность реализации модели состоит в том, что в расчете присутствуют как структуры, разрешаемые расчетной сеткой (надсеточные), так и подсеточные (рис.2). В отличие от реализаций в других CFD-кодах, где подсеточные капли просто отсекаются, либо граница раздела фаз в областях с такими каплями бесконечно «размазывается», в предлагаемом подходе эти капли не теряются, продолжают нести в себе все параметры и характерный размер, участвуют в аэродинамическом взаимодействии с окружающим газом и могут сливаться в надсеточные структуры. Это обеспечивает консервативность массы и, в перспективе, делает возможным перевод этих капель в Лагранджевы координаты для дальнейшего расчета (вторичный распад и испарение) по законам дисперсной фазы, не меняя при этом расчетную область.

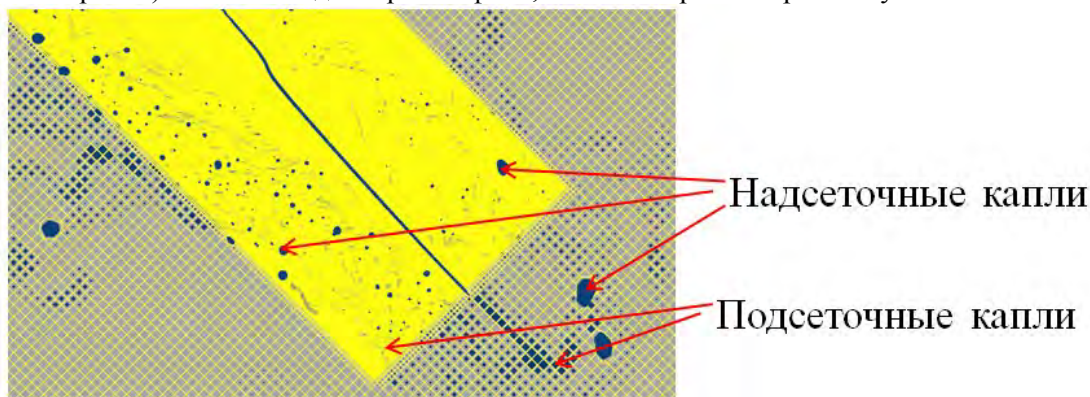


Рис.2 - Надсеточные и подсеточные капли

В рамках модели перенос контактной поверхности описывается конвективным уравнением (для переменной VF):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla f = 0 \quad (1)$$

При ненулевом значении поверхностного натяжения на межфазной границе учитывается давление Лапласа:

$$P_1 = P_2 + \sigma \cdot \text{div } \mathbf{n} \quad (2)$$

, где σ - поверхностное натяжение, \mathbf{n} – нормаль к межфазной границе.

На рис.3. представлен алгоритм маркировки ячеек в зависимости от значения переменной VoF в них и окружающих ячейках. Можно видеть, что поверхностные ячейки со значением $\delta < \text{VoF} < (1-\delta)$, оказавшиеся в окружении газовых ячеек маркируются как “droplet”, а в окружении жидкостных как “bubble”. Ячейки типа “droplet” в данном случае и есть те самые подсеточные капли. Стоит отметить, что параметр δ , называемый «уровень обрезки VOF» пользователь имеет возможность устанавливать через интерфейс программы.

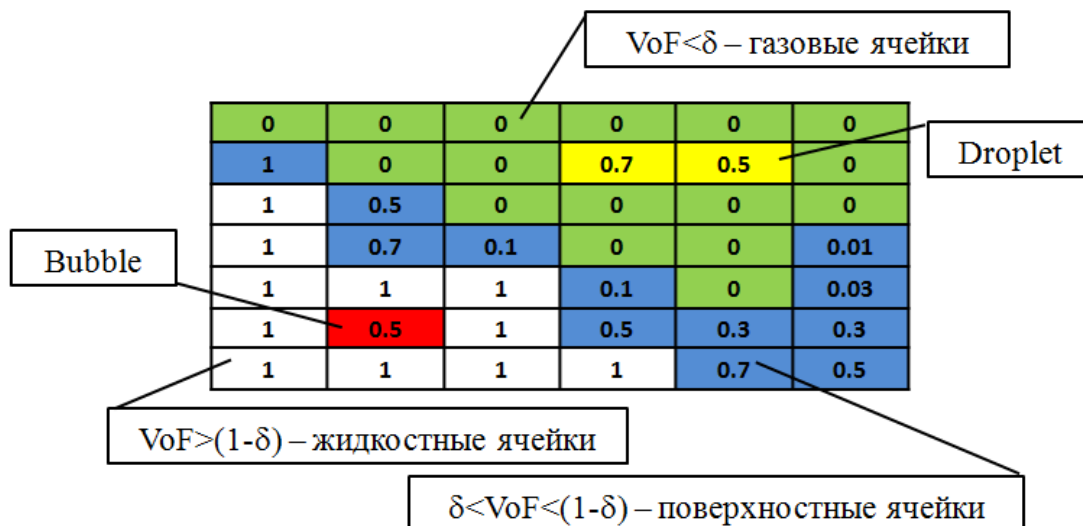


Рис.3 - Маркировка ячеек по переменной VoF

Первичный распад струи

Наиболее важными эффектами, влияющими на распад струи являются турбулентность и кавитация, вне канала форсунки добавляется ещё один – аэродинамическое взаимодействие. На рис. 4 представлена схема распада струи, предложенная в работе [3].

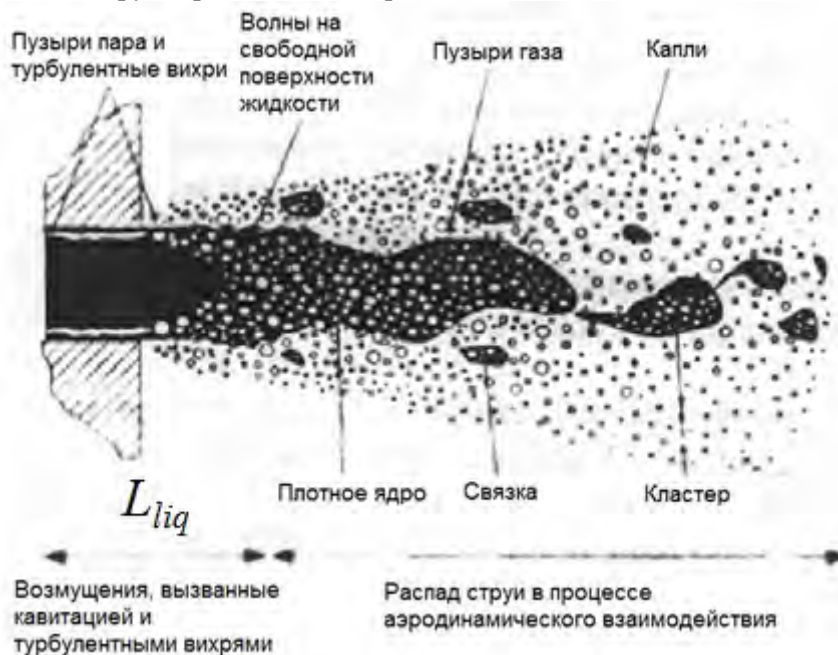


Рис.4 - Схема распада струи[3]

Процесс образования связок, кластеров и первых капель относят к первичному распаду струи, в то время как дальнейшее дробление капель называют вторичным распадом. В процессе распада взаимное действие сил различной природы на поверхность жидкости нарушает её целостность и происходит дробление. К этим силам относятся силы инерции, поверхностного натяжения, аэродинамические силы и силы вязкого трения. Для оценки соотношения между силами используются характеристические числа Рейнольдса, Вебера и Онезорге:

$$Re = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad We = \frac{d \cdot \rho \cdot u^2}{\sigma} \quad Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \cdot d \cdot \rho}} = \frac{\sqrt{We}}{Re} \quad (3)$$

На рис. 5 приведена классификация режимов первичного распада согласно работам [4-5], на график нанесены точки соответствующие экспериментам [6] по впрыскиванию форсункой клапанного типа при различных значениях перепадов давлений и максимального хода иглы.

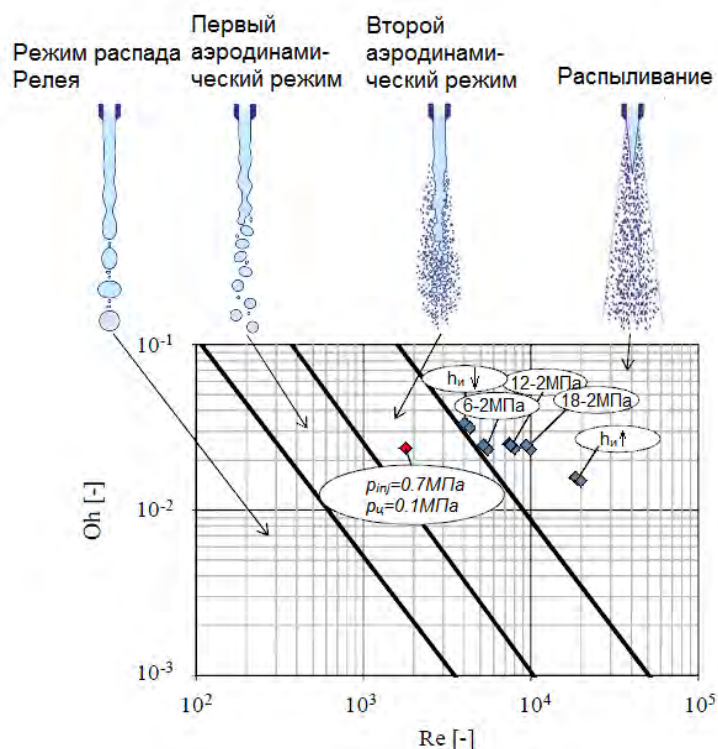


Рис.5 - Классификация режимов первичного распада[6]

Моделирование распада струи, формируемой форсункой клапанного типа

Для моделирования в данной работе была выбрана форсунка клапанного типа. На первом этапе был выбран режим впрыскивания, соответствующий давлению впрыскивания $p_{inj}=0.7\text{МПа}$ и противодействию в цилиндре $p_u = 0.1\text{МПа}$ (рис.5) . Форсунка клапанного типа (рис.6), описанная в работе [6] используется для подачи топлива в двигатель внутреннего сгорания с воспламенением от искры.

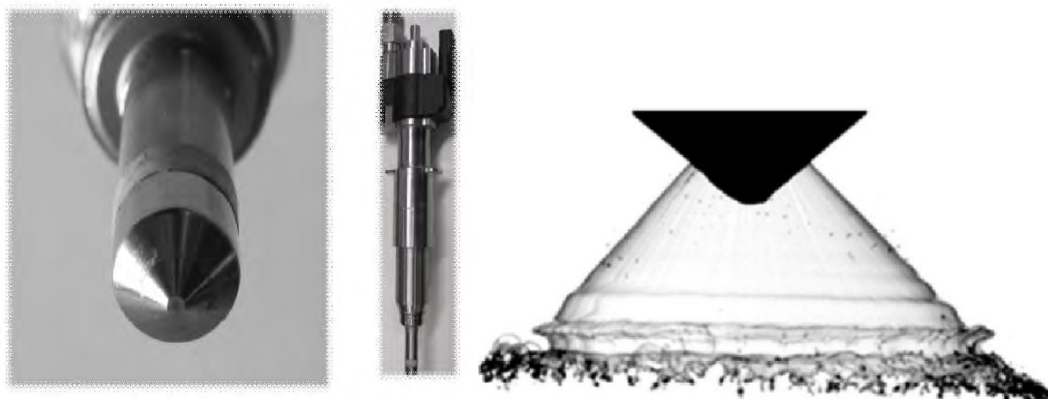


Рис.6 - Форсунка клапанного типа

Реальное распределение капель в струе, формируемой такой форсункой, носит, конечно, трехмерный неоднородный характер, но, как можно видеть из рис.6 наибольшие волновые структуры на поверхности жидкости вполне осесимметричны. Поэтому для демонстрации возможности описания таких структур и предсказания длины невозмущенной струи L_{liq} (рис. 4) была выбрана осесимметричная постановка, которая позволяет значительно снизить требуемые вычислительные ресурсы (рис.7). Движение запорного элемента при моделировании не учитывалось и рассматривалось только истечение при максимальном открытом клапане.

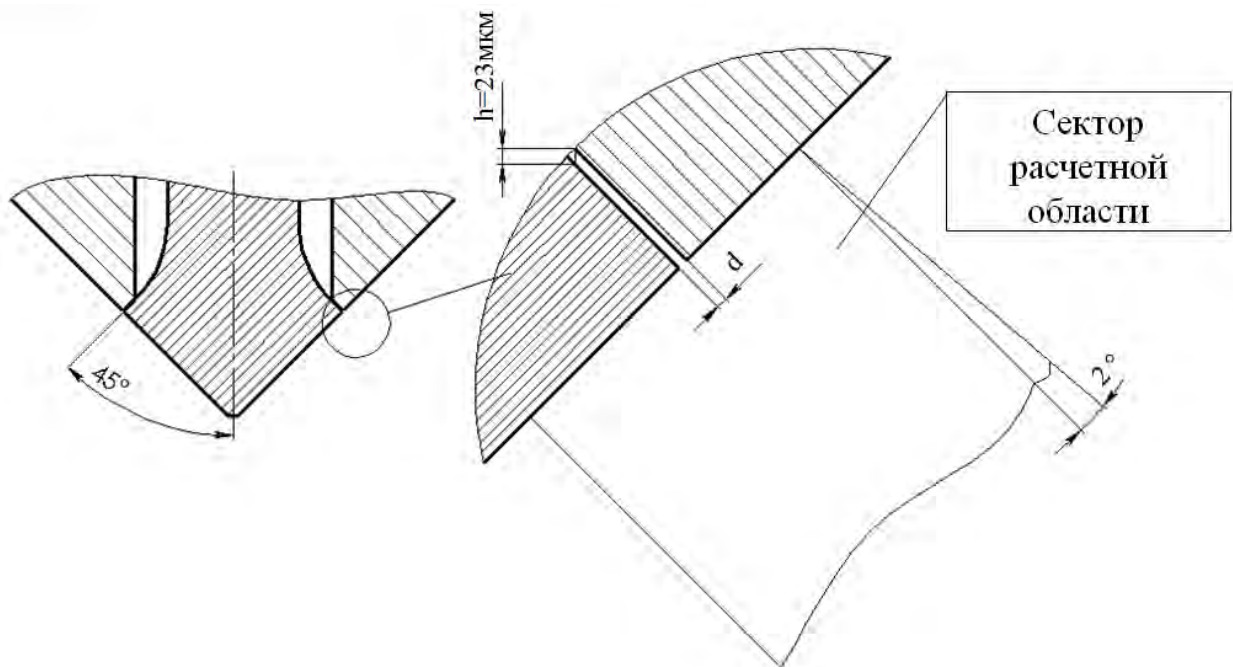


Рис.7 - Выделение расчетной области

При моделировании не использовались модели турбулентности по следующим причинам

- подход осреднения, заложенный в RANS-модели не способен должным образом описывать турбулентные структуры, влияющие на распад струи и, как правило, вызывает «сглаживание» картины истекающей струи в численной модели
- полагается, что если расчетная сетка способна разрешать интересующие размеры структур и капель с точки зрения требований модели VOF, то и соответствующие размеры наиболее влияющих турбулентных структур так же будут разрешены ею
- режим течения в данной задаче является формально ламинарным, значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} = 1900$$

Схема расстановки граничных условий приведена на рис.8. На граничном условии «Вход/выход» задан параболический профиль массовой скорости. Стоит отметить, что для данной задачи необходимо установить «уровень обрезки VOF» равным 10^{-5} , что значительно точнее, чем значение по умолчанию. Это необходимо для того, чтобы учитывалось даже очень малое за один шаг по времени изменение значения переменной VOF в ячейках.

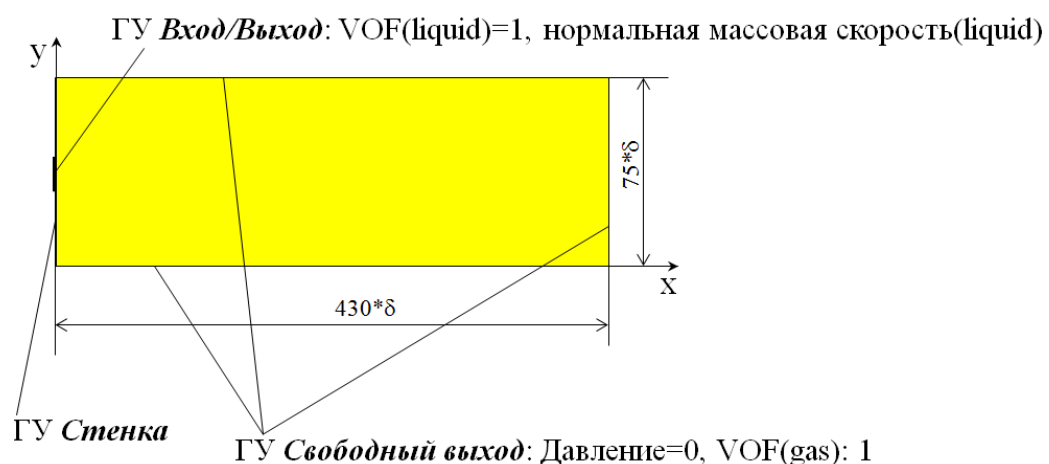


Рис.8 - Граничные условия

Расчетная сетка равномерна по направлениям и имеет адаптацию третьего уровня в зоне струи. Таким образом, минимальный размер элемента составляет $\Delta x = d/14 = 1,2 \mu\text{м}$. С целью экономии ресурсов времени необходимый размер элементов получается при помощи движения объекта перед фронтом струи, который производит периодическое разбитие ячеек (рис.9). Такой подход позволяет получать необходимый размер элементов, не перестраивая сетку на свободной поверхности и не влияя тем самым на решение. С другой стороны, значительно экономится время на начальной стадии

расчета, за счет того, что разбиение происходит по ходу расчета, а не сразу во всем необходимом объеме.

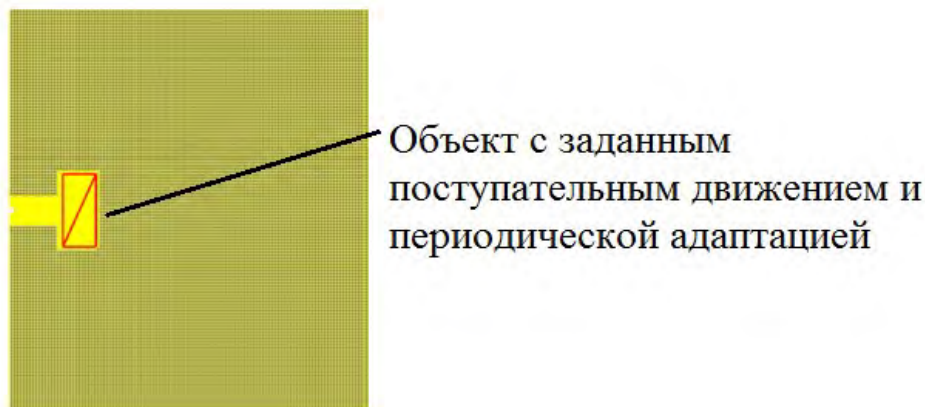


Рис.9 - Расчетная сетка с периодической адаптацией

На рис. 10 представлено сравнение визуализации струй, полученных в эксперименте [6] и при моделировании в данной работе, а на рис.11 представлен график проникновения струи. Согласно данным, представленным в работе [6] значительные волны начинают формироваться на расстоянии около 4 мм от форсунки, аналогичный результат был получен и при моделировании (рис.10-11).



Рис. 10 - Визуализации струй, полученные в эксперименте [6] и при моделировании в FlowVision

Для получения динамики проникновения струи была использована характеристика по пользовательской переменной: $(VOF > 1) * COORD_X$. Так как в редакторе формул ПК FlowVision используется математическая логика, запись $(VOF > 1)$ принимает значение равное единице в случае истинности, таким образом, учитываются все ячейки, включающие какую-либо долю жидкой фазы, в том числе «droplet».

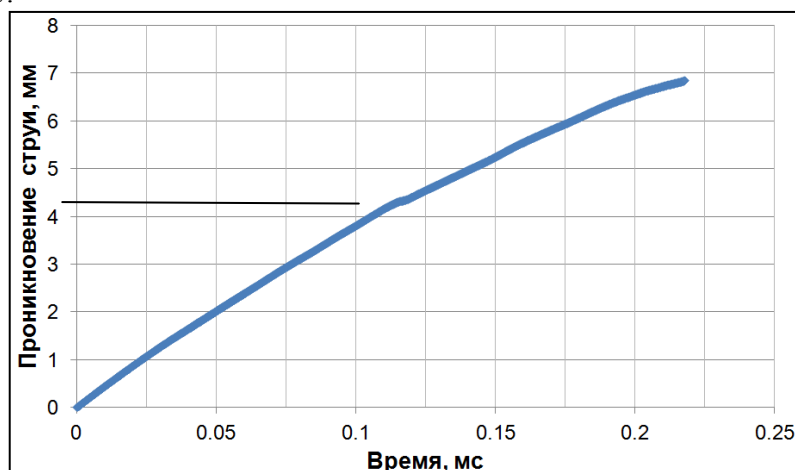


Рис.11 - Проникновение струи

На рис. 12 представлено сравнение визуализаций впрыскиваний форсункой с перепадом давления равным 12 МПа в среду газа с различной плотностью. Можно видеть, что результаты по длине невозмущенной струи L_{liq} хорошо согласуются с теорией В.Г. Левича [7]:

$$L_{liq} = C \cdot d_h \cdot \sqrt{\frac{\rho_{liq}}{\rho_{gas}}} \quad (4)$$

, где C – константа, зависящая от геометрии распылителя и режима впрыскивания, d_h – гидравлический диаметр, в данном случае $d_h=2d$, ρ_{liq} , ρ_{gas} – плотности жидкости и газа соответственно.

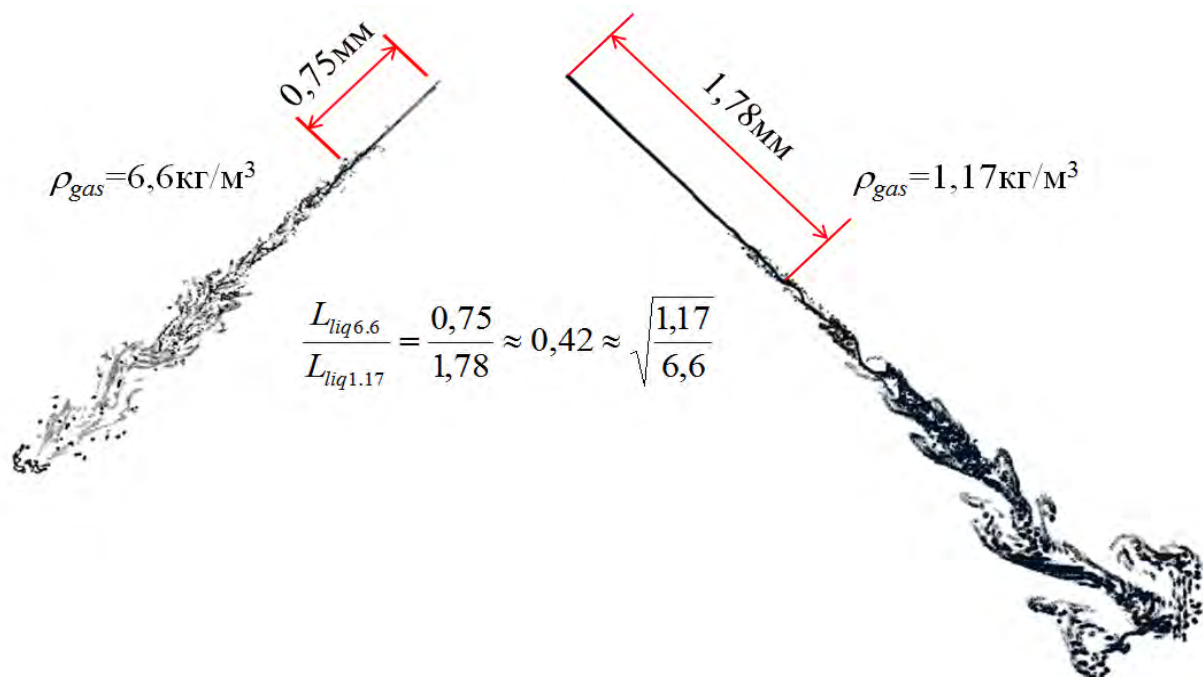


Рис. 12 - Визуализации впрыскивания в среду с различной плотностью

Согласно (4) для неизменной геометрии распылителя и режима впрыскивания длина невозмущенной струи зависит от отношения плотностей жидкости и газа. В исследуемых случаях плотность жидкости одинакова, поэтому отношение длин невозмущенной струи должно быть равно квадратному корню из обратного отношения плотностей газовой среды, что продемонстрировано на рис. 12.

Выводы

- Возможности ПК FlowVision позволяют решать задачи, связанные со струями и каплями
- Результаты по моделированию хорошо согласуются с экспериментами и теорией
- Для получения результатов по проникновению струи и образованию крупных структур, носящих осесимметричный характер, возможно использование двухмерной постановки
- Реализация модели Volume of Fluid в ПК FlowVision имеет ряд преимуществ, позволяющих моделировать процессы распада струй с большей точностью

Список литературы

1. Лышевский А.С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. М.: Машгиз, 1963. 180 с.
2. Ménard, T., Tanguy, S. and Berlemont, A. Coupling level set/VOF/ghost fluid methods: Validation and application to 3D simulation of the primary break-up of a liquid jet. International Journal of Multiphase Flow; 33(5):510-24, 2007
3. Fath, A., Fettes, C., and Leipetz, A. 1998. Investigation of the Diesel Break-up Close to the Nozzle at Different Injection Conditions, The Fourth International Symposium COMODIA 98, p.p. 429-434, Kyoto, Japan
4. Ohnesorge V.W. Anwendung eines kinematographischen Hochfrequenzapparates mit mechanischer Regelung der Belichtung zur Aufnahme der Tropfenbildung und des Zerfalls flüssiger Strahlen // Dissertation Techn. Hochschule Berlin 1937
5. Reitz R.D. Atomization and other Breakup Regimes of a liquid jet // Ph.D. Thesis, Princeton University, 1978.
6. A.Schmid. Experimental characterization of the two phase flow of a modern, piezo activated hollow cone injector // Dr .Dissertation. DISS. ETH NO. 20852. Zürich
7. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — Изд. 2-е, дополненное и переработанное. — М.: ГИФМЛ, 1959. — 700 с. — 5000 экз.