



# Использование САЕ-системы FlowVision для исследования взаимодействия потоков жидкости в центробежно-струйной форсунке

Елена Туманова

В данной работе численное исследование проводилось с использованием программного комплекса FlowVision, который предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также для визуализации этих течений методами компьютерной графики. С помощью указанного программного комплекса в работе решалась задача моделирования взаимодействия потоков жидкости внутри центробежно-струйной форсунки с тангенциальным вводом периферийного потока.

которой далее импортировался в комплекс FlowVision. Геометрия расчетной области представляет собой объем, в котором определены уравнения математической модели. Поверхности расчетной области представляет собой совокупность плоских многоугольников — фасеток, на которых определены граничные условия.

При исследовании гидродинамических характеристик форсунки интерес представляет взаимодействие потоков внутри камеры смещения и в сопловом отверстии. Поэтому после численного

центробежно-струйной форсунки показана на рис. 2.

В постановке задачи использовались следующие граничные условия:

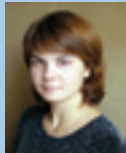
1. Стенка с логарифмическим законом изменения скорости в турбулентном пограничном слое.
2. На входе задавалась нормальная скорость потока.
3. Выход свободный с нулевым давлением на границе.

В данной модели граничное условие «вход» было задано на пяти поверхностях, соответствующих поперечным сечениям четырех тангенциальных отверстий и одного осевого отверстия. Скорость жидкости на входе осевого канала была принята 6,5 м/с, на входе тангенциальных каналов — 5 м/с. Граничное условие «свободный выход» использовалось для поверхности, соответствующей поперечному сечению соплового отверстия форсунки; применялось условие «давление, без втока жидкости».

Целью моделирования движения жидкости в расчетной области

**Елена Туманова**

Преподаватель кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения» Уфимского государственного нефтяного технического университета.



ти является получение распределений скорости и давления жидкости. Чтобы рассчитать эти параметры, необходимо задать физические законы их изменения, а именно математическую модель. В качестве последней в данной работе для решения задачи формирования внутри камеры смешения факела распыленной жидкости использовалась модель «несжимаемая жидкость», которая позволяет моделировать течение при больших числах Рейнольдса и малых изменениях плотности.

Для решения уравнений математической модели в работе применялась прямоугольная, адаптивная, локально измельченная конечно-объемная сетка. Схема

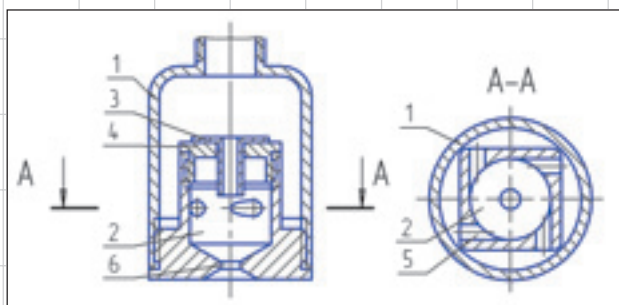


Рис. 1. Эскиз центробежно-струйной форсунки: 1 — корпус форсунки; 2 — камера смешения; 3 — втулка осевого канала, 4 — крышка камеры смешения; 5 — тангенциальный канал, 6 — сопловое отверстие

Эскиз конструкции форсунки, для которой были проведены испытания, представлен на рис. 1. Следует отметить, что прототипами исследованной форсунки являются форсунка ВТИ и форсунка по авторскому свидетельству № 1118420. Характерные размеры форсунки были следующие: диаметр соплового отверстия — 4 мм, диаметр тангенциальных и осевого каналов — 3 мм, внутренний радиус камеры смешения — 8 мм, высота зоны взаимодействия потоков изменялась от 6 до 16 мм.

## Постановка задачи

Первоначально была создана твердотельная модель внутреннего пространства форсунки, файл

расчета полной форсунки, для некоторого упрощения задачи, твердотельная модель была сокращена и не содержала пространство вне камеры смешения. Данное упрощение не искажает конечный результат, поскольку геометрия камеры смешения не изменена. Численный расчет полной форсунки позволил нам оценить соотношение скоростей жидкости в осевом и тангенциальных каналах. В тангенциальных каналах скорость жидкости несколько меньше, чем в осевом, вследствие гидравлических потерь напора из-за необходимости направления движения. Полученная модель исследуемой внутренней области камеры смешения

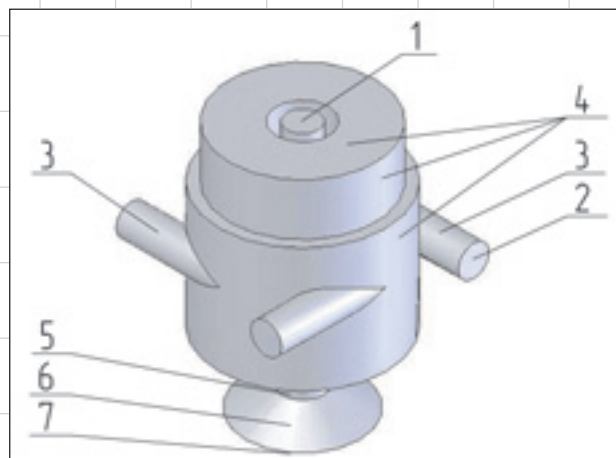


Рис. 2. Геометрия расчетной области: 1 — входное отверстие для осевого потока жидкости; 2 — входное отверстие для периферийного потока жидкости; 3 — стенка тангенциального канала; 4 — стенка камеры смешения форсунки; 5 — стенка соплового канала; 6 — расточка соплового канала на выходе из форсунки, 7 — выходное отверстие форсунки

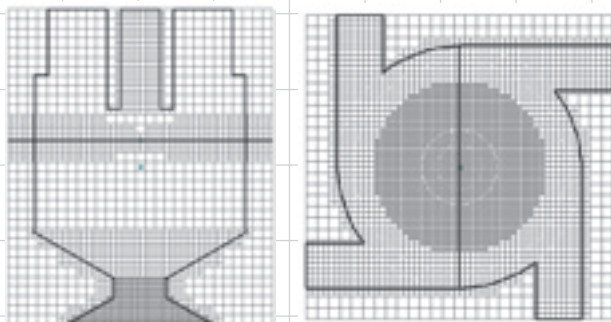


Рис. 3. Расчетная сетка: а — вид сбоку; б — вид сверху

сетки, использовавшейся для решения данной задачи, представлена на рис. 3.

Размеры одной ячейки начальной сетки составляют 0,7440,7240,74 мм. Адаптация 1-го уровня проведена по поверхностям: конусная поверхность камеры смешения на входе в сопловой канал, стенки осевого и тангенциальных каналов, входы осевого и периферийных потоков жидкости. Адаптация 2-го уровня проведена по поверхностям соответствующим сопловому каналу, расточки соплового канала и выхода жидкости из форсунки. Объемная адаптация 1-го уровня создана в зоне соплового канала, она охватывает конусную поверхность камеры смешения и расточку. Объемная адаптация 2-го уровня охватывает сопловой канал.

Жидкость для расчета была задана из базы данных FlowVision: чистая вода, керосин, а также для расчета использовалась жидкость, внесенная в базу данных пользователем, — вакуумный газойль. Физические параметры жидкостей, использованных для расчета, а также опорные значения, при которых производилось моделирование, представлены в табл. 1. Опорная температура для вакуумного газойля, а также плотность и вязкость при этой температуре приняты по результатам работы модернизированной регулярными насадками колонны ус-

любой точке внутренней полости, которые позволяют детально исследовать процесс взаимодействия потоков, выбрать оптимальное соотношение размеров форсунки и определить диапазон ее работы, что необходимо для обеспечения равномерного орошения поверхности жидкостью форсунками простой и надежной конструкции.

Для определения параметров распыленного факела рассчитан-

### Результаты численного эксперимента

В результате численного эксперимента получены распределения скоростей и давления жидкости во всех точках расчетного пространства, что позволило оценить эффективность конструкции.

На рис. 4 представлено распределение полной скорости в продольном и поперечном сечении камеры смешения форсунки.

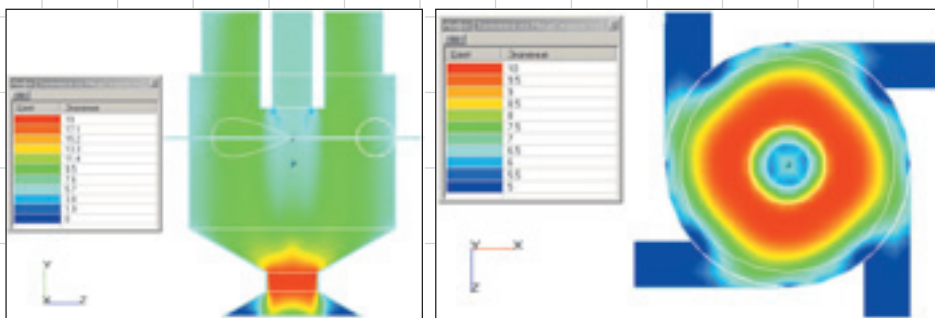


Рис. 4. Распределение полной скорости (м/с) внутри камеры смешения центробежно-струйной форсунки: слева — в продольном сечении; справа — в поперечном

тановки первичной переработки нефти.

Параметры расчетного метода для определения скорости и давления использовались принятые по умолчанию для данной модели расчета.

Исследуемый геометрический параметр форсунки (высота поднятия втулки осевого канала  $h$ ) для численного эксперимента задавался при построении твердотельной модели внутреннего пространства.

Численный расчет в данном программном комплексе не позволяет моделировать факел распыленной жидкости и оценить его дисперсность, поскольку в программе не заложен учет силы поверхностного натяжения жидкости и взаимодействия ее с окружающей средой. Поэтому результатом численного эксперимента являются полученные значения скорости и давления в

любой точке внутренней полости, которые позволяют детально исследовать процесс взаимодействия потоков, выбрать оптимальное соотношение размеров форсунки и определить диапазон ее работы, что необходимо для обеспечения равномерного орошения поверхности жидкостью форсунками простой и надежной конструкции.

Распределение скорости представлено в виде заливки по значениям. Поперечное сечение проходит через центр тангенциальных каналов.

На рис. 5 показано распределение осевой и тангенциальной скорости в продольном сечении камеры смешения форсунки.

На рис. 6 изображено распределение полного давления в про-

Таблица 1. Параметры жидкостей, использованных для численного эксперимента

Жидкость	Опорные величины		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Вязкость, Па·с
	Температура, К	Давление, Па		
Чистая вода	293	101 000	998	0,001
Керосин	293	101 000	824	0,002
Вакуумный газойль	373	101 000	862	0,007

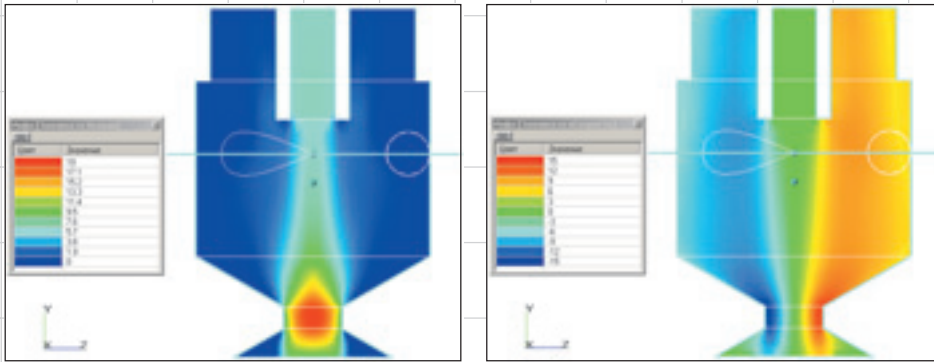


Рис. 5. Распределение осевого и тангенциального компонентов скорости (м/с) внутри камеры смешения центробежно-струйной форсунки: слева — осевой компонент скорости, справа — тангенциальный

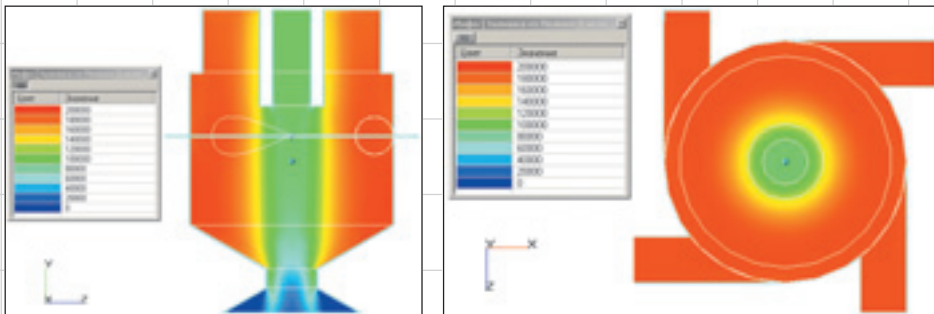


Рис. 6. Распределение полного давления (Па) внутри камеры смешения центробежно-струйной форсунки: слева — в продольном сечении; справа — в поперечном

дольном и поперечном сечении камеры смешения форсунки.

Из рис. 4 видно, что тангенциальные потоки, входя в камеру смешения, вначале не взаимодействуют с осевой струей. Осевой поток, проходя примерно до середины камеры смешения, перемещивается своими периферийными слоями с жидкостью, заполняющей камеру смешения. В результате этого снижается скорость периферийных слоев осевого потока (рис. 4а и 5а). Взаимодействие осевого и вращающегося потоков начинается на входе в сужающуюся часть камеры смешения перед сопловым отверстием.

Из рис. 5б видно, что в сопловом отверстии форсунки тангенциальный компонент скорости возрастает от центра к периферии. В центре соплового канала тангенциальный компонент скорости равен нулю. Это соответствует тому, что в сопловом канале взаимодействуют осевой и вращающийся потоки, тогда как полная скорость жидкости в сопловом канале постоянно по всему поперечному сечению (рис. 4а).

Следует отметить, что полное давление в данном программном комплексе складывается из избы-

точного и динамического, без учета атмосферного. Атмосферное давление задано в опорных величинах, поэтому ноль на шкале давлений (рис. 6) соответствует 101 000 Па. Из рис. 6 видно, что полное давление жидкости в камере смешения возрастает к периферии. На выходе из камеры смешения давление падает до атмосферного.

Из рис. 4 и 5 видно, что распределение скоростей имеет окружную равномерность, поэтому рассмотрим распределение осевого, тангенциального компонентов и полной скорости в виде графиков вдоль радиуса, лежащего в плоскости соплового отверстия.

Распределение скоростей для численного эксперимента на воде представлено на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что полная скорость сохраняет постоянное значение практически по всему поперечному сечению соплового отверстия, тогда как осевая скорость убывает от центра к периферии, а тангенциальная, наоборот, возрастает, что согласуется с литературными данными и говорит о взаимодействии в сопловом канале форсунки двух потоков — поступательного и вращательного.

На данном рисунке не просматривается принципиальное отличие в распределении скоростей при изменении высоты камеры смешения. Для того чтобы различия были нагляднее, представим распределение полной скорости на рис. 8 с более подробной шкалой.

Из рис. 8 четко видны различия в распределении полной скорости по поперечному сечению соплового отверстия при изменении высоты камеры смешения.

По результатам численного расчета форсунки с использованием жидкости «керосин» также были построены графики распределения скорости и ее компонентов вдоль радиуса соплового отверстия, которые представлены на рис. 9. Графики полной скорости с более подробной шкалой ординат показаны на рис. 10.

Из рис. 9 и 10 видно, что изменение вязкости жидкости в 2 раза существенно не повлияло на распределение скоростей в сопловом канале форсунки. Однако численный расчет с использованием жидкости «вакуумный газойль» показал, что вязкость все же оказывает влияние на взаимодействие потоков и с ее увеличением оптимальная высота камеры смешения возрастает. На рис. 11 представлены графики полной скорости вдоль радиуса соплового отверстия для жидкости «вакуумный газойль».

Из рис. 11 видно, что для жидкости «вакуумный газойль» оптимальная высота камеры смешения — 16,0 мм. Следует отметить, что вязкость вакуумного газойля в 7 раз больше вязкости воды, а оптимальная высота камеры смешения при этом увеличилась всего на 11%.

Характер графиков полной скорости вдоль радиуса соплового отверстия повторяет вид графиков распределения плотности орошения вдоль радиуса орошенной поверхности. Последние получены в результате натурных экспериментов для центробежно-струйной

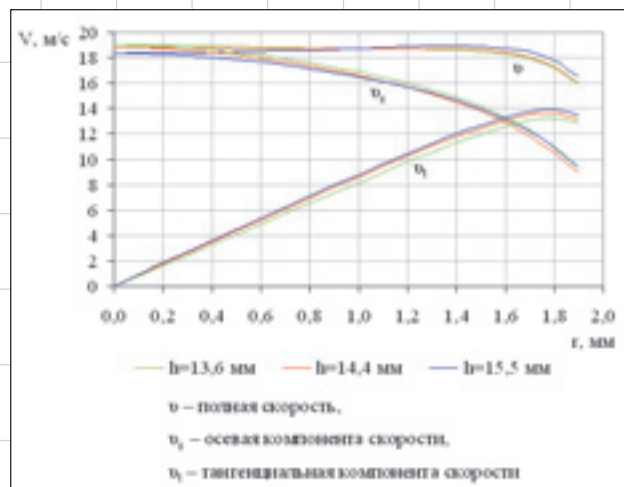


Рис. 7. Графики полной скорости и ее компонентов вдоль радиуса соплового отверстия для воды

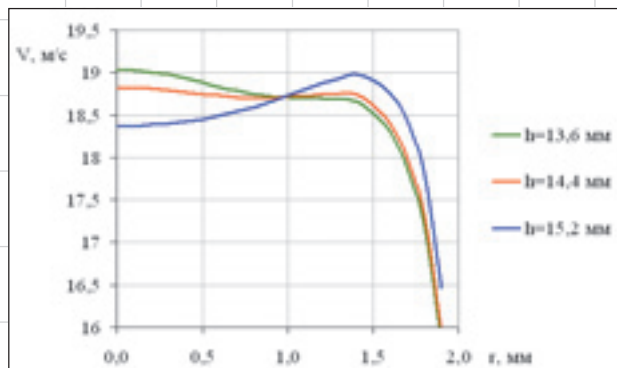


Рис. 8. Графики полной скорости вдоль радиуса соплового отверстия для воды

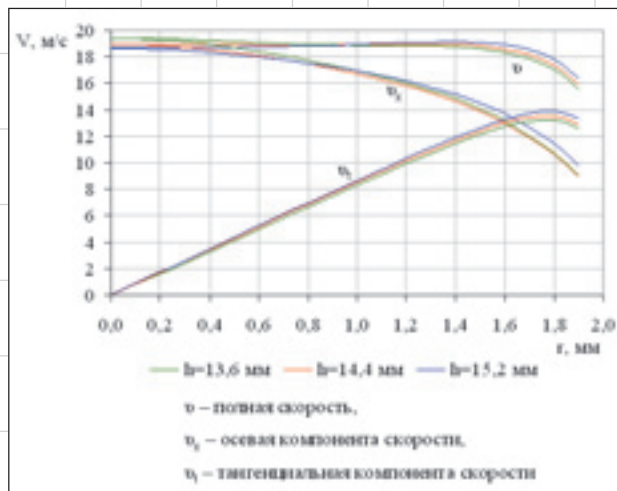


Рис. 9. Графики полной скорости и ее компонентов вдоль радиуса соплового отверстия для керосина

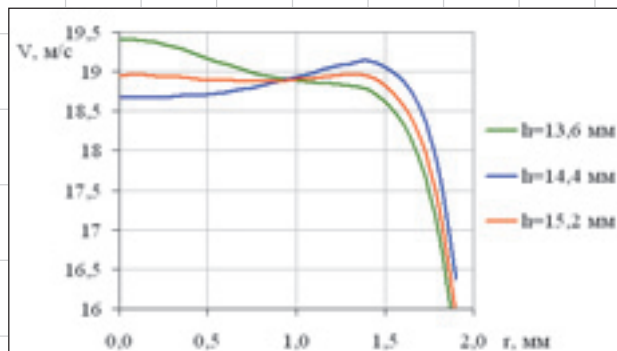


Рис. 10. Графики полной скорости вдоль радиуса соплового отверстия для керосина

форсунки с тангенциальным вводом периферийного потока. Натурные эксперименты проводились на форсунке, эскиз которой приведен на рис. 1. При проведении натурных экспериментов изменялся геометрический параметр — высота зоны взаимодействия потоков — путем поднятия и опускания втулки осевого канала. Натурный эксперимент был проведен на жидкости «вода» при

перепаде давления жидкости на форсунке 300 кПа и расходе жидкости  $1,7 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с. В результате натурного эксперимента получены графики плотности орошения, которые представлены на рис. 12.

При использовании разработанной автором методики расчета плотности орошения форсунок, исследованными численно, были получены расчетные графики плотности орошения. При рас-

НОВОСТИ

**НПО «Сатурн» выбрало LMS Test.Lab**

Во время международного авиакосмического салона МАКС-2005 компании LMS International и ОАО «НПО «Сатурн» подписали контракт на поставку 250-канальной системы динамических измерений. Система производства компании LMS будет использоваться для сертификационных и производственных испытаний нового авиационного газотурбинного двигателя SaM146, который разрабатывается совместно НПО «Сатурн» и французской двигателестроительной компанией Snecma. Этот двигатель предназначен для установки на российский региональный самолет (RRJ), создаваемый ЗАО «Гражданские самолеты Сухого».

Решение компании LMS представляет собой уникальную комбинацию программного комплекса LMS Test.Lab и цифровых систем сбора данных SCADAS III. Полностью синхронизированные системы сбора и обработки данных вибрационных и акустических измерений, оснащенные 24-битными процессорами, обеспечивают преобразование сигналов, имеют встроенную систему хранения калибровочных значений, средства параллельной обработки и отличаются высокой производительностью при дискретизации, цифровой обработке сигналов, а также сквозной записи данных на жесткий диск компьютера.

Программный пакет LMS Test.Lab обеспечивает настройку параметров испытаний, визуализацию измерений на нескольких графических мониторах, а также анализ и обработку данных испытаний. Система LMS позволяет одновременно по всем каналам (вибро-, тензо-, тахо- и др.) параллельно проводить мониторинг различных спектров сигналов в реальном масштабе времени с выдачей предупреждающих и аварийных сигналов и непрерывную запись данных в течение 8 часов. Все данные хранятся в централизованной системе архивирования, которая легко управляется с помощью программного комплекса управления инженерными данными LMS Tec.Manager.

В аэрокосмической отрасли эффективность испытаний — ключевой аспект при совершенствовании конструкции двигателя и снижении затрат на процесс сертификации. Общей тенденцией в технологии испытаний авиадвигателей является увеличение количества одновременно обрабатываемых статических и динамических каналов для получения большей информации в процессе измерений и при последующей обработке и анализе.

В рамках данного контракта LMS также поставляет пакет приложений численного моделирования LMS Virtual.Lab Aero-Acoustic Modeling, основанный на популярном приложении LMS SYSNOISE для исследования явлений, связанных с аэроакустическими шумами. Определение аэроакустических источников начинается с расчета уравнений потока в пакете газодинамического анализа. Затем рассчитывается излучаемый или распределенный шум с использованием гранично-элементных методов расчета. Мощные инструменты постпроцессной обработки позволяют инженерам представлять и анализировать результаты расчетов для дальнейшей разводки двигателя по акустическим характеристикам. LMS Virtual.Lab требует только моделирования граничных условий системы, в результате чего получаются относительно небольшие акустические модели, обеспечивающие с минимальными затратами времени и сил точное решение реальных задач.

Путем интеграции технологий SYSNOISE в LMS Virtual.Lab компания LMS создала первое в мире приложение для сквозного моделирования акустических характеристик: от концептуального проектирования через коррективку с использованием численных моделей до верификации моделей по результатам испытаний натурных изделий.

С российской стороны работы по контракту обеспечивают российские компании «НОВАТЕСТ» и «ТЕСИС».

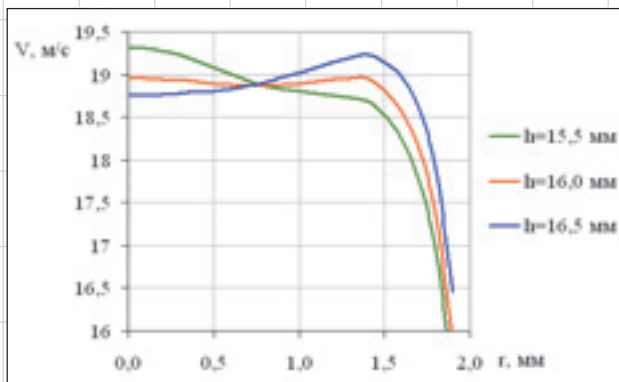


Рис. 11. Графики полной скорости вдоль радиуса соплового отверстия для вакуумного газойля

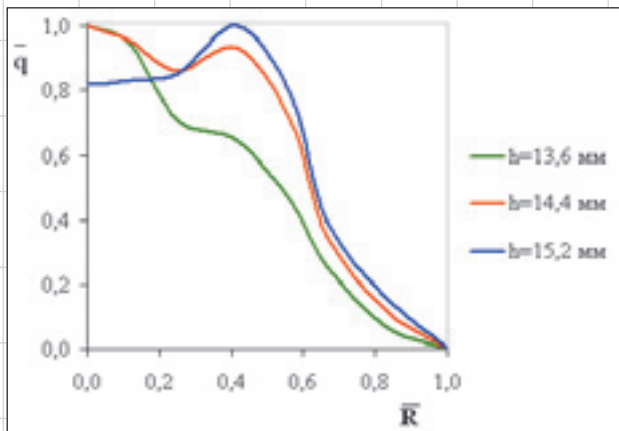


Рис. 12. Экспериментальные графики плотности орошения вдоль радиуса орошенной поверхности в относительных значениях

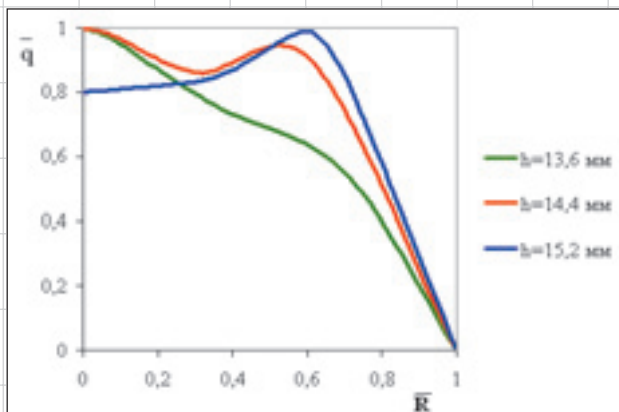


Рис. 13. Графики расчетной плотности орошения для жидкости «вода»

чете плотности орошения исходными данными являются графики полной скорости и ее скорости вдоль радиуса соплового отверстия (см. рис. 7). Методика расчета плотности орошения основана на расчете траекторий капель с учетом изменения силы сопротивления, действующей на капли со стороны газового потока. Расчетные графики плотности орошения представлены на рис.

13. Плотность орошения приведена в относительных значениях для удобства сравнения результатов с натурным экспериментом.

Из рис. 12 и 13 видно, что характер распределения расчетной плотности орошения согласуется с экспериментальными данными. Это подтверждает правильность постановки численного эксперимента и методики расчета плотности орошения. ►