

**Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПЕТРА ВЕЛИКОГО»
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Клейманов Роман Валерьевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В
ПРОЦЕССАХ ГАЗОФАЗНОГО ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР**

Направление подготовки: 28.06.01 «Нанотехнологии и наноматериалы»

Код и наименование

Направленность: 28.06.01_01 «Нанотехнологии и наноматериалы (по отраслям)»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах выпускной квалификационной работы

Аспирант:

_____ Клейманов Р.В.

Научный руководитель: д.х.н.,

_____ Александров С.Е.

Санкт Петербург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Физико-химия и технологии микросистемной техники» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: – *Александров Сергей Евгеньевич, д.х.н., профессор, заведующий кафедрой «Физико-химия и технологии микросистемной техники», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»*

Рецензент: – *Смирнов А.Д., к.т.н., ведущий специалист по твердокремниевым приборам АО «Светлана-Электрон-прибор»*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Сущность процессов химического осаждения из газовой фазы, или CVD процессов (как это принято в мировой литературе и практике) состоит в получении веществ в твердом состоянии в виде порошков, пленок, наноразмерных материалов за счет химических превращений реагентов, одновременно подаваемых в реакционный объем (реактор) в газообразном или плазменном состоянии. В случае реагентов, находящихся при нормальных условиях в газообразном состоянии или характеризующихся высоким давлением насыщенного пара при сравнительно низких температурах (до 100 °С), процесс перевода их в газообразное состояние и доставка в реактор не представляют проблем. Однако, в последние годы возрос интерес к применению относительно недорогих металлоорганических соединений, обладающих низкой летучестью и для создания приемлемых с точки зрения производительности процесса парциальных давлений требуются температуры, превышающие 300 °С, что приводит к резкому усложнению испарительных устройств, необходимости подогрева всех транспортных магистралей для предотвращения конденсации и другим технологическим особенностям. Кроме того, существуют ряд CVD процессов, например, химическое осаждение особо чистого кварцевого стекла в пламени водородной горелки, требующие значительных расходов кремнийсодержащего реагента (до 1 кг/ч), которые невозможно обеспечить, применяя обычные испарители барботажного или зеркального типа [1]. В этой связи для решения подобного рода задач широко применяется подача реагентов в реактор в виде аэрозолей, генерируемых с помощью различного типа небулайзеров, капли которых попадают в нагреваемую зону и быстро переходят в парообразное состояние [2, 3]. Ультразвуковые небулайзеры наиболее распространены в системах подачи реагентов для реализации CVD-процессов осаждения тонких пленок [4, 5], однако они характеризуются низкой производительностью и ограниченным периодом времени непрерывной работы. В случае CVD процессов, предназначенных для получения синтезированного материала с большой скоростью и в значительных количествах, наибольший интерес представляют аэродинамические распылители [4].

Форсунки традиционных конструкций, сконструированные на основе устройств для распыления топлива в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания представляют собой достаточно узкоспециализированные устройства, требующие больших давлений для распыления жидкости и не обладающие универсальностью. Так смена одного реагента на другой с отличающимися параметрами вязкости, поверхностного натяжения и плотности может привести к невозможности осуществлять распыление из-за достаточно узкого диапазона параметров, которые

могут быть настроены в распылителе подобной конструкции без переделки отдельных его узлов.

Из рассмотренных в ходе работы конструкций, в промышленных и лабораторных установках ХОГФ наибольшее распространение получили форсуночные и ультразвуковые распылители. Первые применяются в случаях, когда требуется обеспечить большой расход реагента, ультразвуковые системы подачи реагента более часто применяются в лабораторных установках из-за невозможности обеспечить с их помощью большой расход реагента и перегрева при длительной работе. На рынке промышленного и лабораторного оборудования существует несколько производителей, осуществляющих поставку комбинированных распылительных систем, использующих барботирование (пропускание газа через жидкость) для распыления вспененного реагента или ультразвуковых устройств распыления. Специфические задачи синтеза, например, получение высокочистого кварца из кремнийорганических реагентов не допускает контакта реагента с металлами. В таких случаях применяют испарительные устройства для подачи реагента в виде пара, при этом, все элементы (в том числе, и камера испарителя, элементы нагревателя), контактирующие с реагентом выполняются из кварца. Существует потребность в создании универсального устройства, позволяющего осуществлять подачу высоколетучих компонентов с большими расходами, при этом, достаточно универсальную как по распыляемым жидкостям (что ставит под сомнение использование в данном качестве традиционных гидравлических форсунок)

Анализируя состав и возможности оборудования, используемого в процессах ХОГФ, особенно, применительно к подаче высококипящих реагентов, можно сделать вывод о наличии потребности в универсальном устройстве, позволяющим варьировать в широких пределах расход реагента (от малых до очень больших, порядка 500 г/ч и выше на каждый канал распылителя), обладающего простой конструкцией, и не требующего дополнительного сложного оборудования (насосы высокого давления, сложные системы управления), по возможности, допускающего использование технологического газа для подачи реагента в реактор. Таким образом, задачей исследования является разработка устройства для распыления или испарения высококипящего реагента, основанного на аэродинамическом способе распыления и доставки реагента. Необходимо исследование процессов тепломассобмена в распылителе, построение его расчетной модели и последующая проверка экспериментальным путем работоспособности прототипа устройства.

Таким образом можно заключить, что существует потребность в разработке и создании системы, позволяющей гибко варьировать параметры подачи реагента, при этом, обеспечивающей как возможность точного дозированного распыления реагента, так и подачи его с большим расходом при возможности работы длительное время и при высоких температурах.

Целью исследования

Целью настоящей работы являлась разработка конструкции устройства для подачи реагента в горячую зону реактора, обеспечивающего высокую производительность и возможность регулировки расхода распыляемой жидкости в широких пределах. Кроме того, для подтверждения конструкторских и проверочных расчетов планировалось экспериментальное испытание прототипа распылителя для подачи с большим расходом (до 300 мл/ч) кремнийсодержащего вещества – декаметилциклопентасилоксана, являющегося перспективным реагентом для синтеза в кислородно-водородной горелке высококачественного кварцевого стекла. Анализ литературных данных показывает, что обычно при использовании водород-кислородных горелок для синтеза кварцевого стекла из кремнийорганических реагентов применяются расходы газа в диапазоне 10-30 л/мин на каждую из горелок в зависимости от конструкции реактора. В этой связи при создании прототипа распылителя были задан расход газа-распылителя до 20 л/мин, при этом расход реагента должен обеспечиваться до 300 мл/ч.

Основные задачи:

1. Разработка конструкции аэродинамического распылителя на основе сверхзвукового сопла;
2. Построение математической модели течения для определения геометрических параметров каналов подачи газа и жидкости;
3. Сравнение результатов натурных экспериментов с проектными значениями, полученными в результате численного моделирования;
4. Разработка конструкции системы подачи реагента испарительного типа для работы с легкими газами-носителями;
5. Построение численной модели испарителя и настройка геометрии проточной части, схемы расположения и мощности нагревателей;
6. Экспериментальная проверка работоспособности конструкции, спроектированной на основе численной модели.

Объект исследования.

Объектом исследования на этапе рассмотрения аэродинамического распылителя является плоское сверхзвуковое сопло Лавала с внутренним телом. Для задачи с

рассмотрением испарителя в качестве объекта выступал трубчатый кварцевый испаритель с внешним нагревом и подачей реагента через пористую вставку в аэродинамическую форсунку с внутренним перемешиванием потоков и подачей реагента в зону нагрева в виде пены.

Предмет исследования.

Пространственные распределения полей скорости, температуры и давления, получаемые в ходе численного моделирования течения парогазовой смеси реагента и газа-носителя в проточной части распылителя и испарителя. Распределения параметров получены в ходе сопряженного расчета течения двухфазного потока с учетом теплообмена со стенками при стационарном режиме течения.

Методы исследования.

Численное моделирование течения одно- и двухфазных неизотермических потоков методами вычислительной гидродинамики.

Научная новизна

1. Предложенная схема аэродинамического распылителя базируется на плоском сопле Лавала с внутренним телом, что упрощает конструкцию;
2. Используется разрежение в сопле для подачи реагента в высокоскоростной поток, при этом применены решения для стабилизации подачи реагента;
3. Конструкция распылителя позволяет оперативно изменять конфигурацию сопла, а вместе с ней и расходные характеристики;
4. Разработанный распылитель пригоден для подачи реагентов со значительно различающимися свойствами (вязкость, поверхностное натяжение, плотность);
5. Разработан испаритель, позволяющий переводить высококипящие реагенты в пар без излишнего перегрева при распылении в потоке легкого газа;
6. Конструкция разработанного испарителя обеспечивает минимальное загрязнение реагента и может быть применена в процессах осаждения, особенно требовательных к чистоте получаемого продукта.

Обоснованность положений, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментальным исследованием разработанных конструкций и сравнением параметров, полученных в результате построения численных моделей течения в устройствах с результатами измерений на прототипах устройств в лабораторных условиях.

Практическая значимость работы

Практическая значимость состоит в разработке и апробации образцов технологического оборудования, которое позволяет осуществлять подачу высококипящих реагентов с большими расходами и возможностью обеспечения как дозированной подачи, так и большого расхода реагента.

Внедрение результатов работы.

Результаты исследований и наработки были использованы при создании установки для обеспечения синтеза высокочистого кварцевого стекла из декаметилциклопентасилоксана.

Апробация результатов исследования.

Результаты, полученные в рамках данной работы, представлялись и обсуждались на следующих научно-методической конференции Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену "Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена" совместно с XXI Школой-семинаром молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках".

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в непосредственной разработке конструкции и проведении всех расчетов. Проведено исследование с применением численных моделей. Проведено испытание прототипа распылительного устройства и испарителя.

Публикации. По теме диссертации опубликовано три печатные работы, одна из которых - в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК

Представление научного доклада: основные положения

1. Спроектированное, изготовленное и испытанное в ходе данной работы устройство подачи реагента позволяет производить распыление вязких высококипящих реагентов для подачи в испарители или непосредственно камеры реакторов с расходами реагента до 300 мл/ч
2. Универсальность устройства, достигаемая за счет легко адаптируемой геометрии проточной части под требуемый расход газа и реагента, позволяет производить распыление высококипящих вязких жидкостей (на примере декаметилциклопентасилоксана) с обеспечением требуемых расходов газа и жидкости.
3. Распылитель на основе сопла Лавалья с внутренним телом обладает возможностью изменения критического сечения сопла без его переделки, а также отличается простотой ввода реагента в поток. Конструкция сопла с перерасширением обеспечивает достаточное измельчение капель в потоке за переотраженным скачком уплотнения.
4. Разработанный в ходе работы испаритель позволяет подавать декаметилциклопентасилоксан с расходом 300г/ч в атмосфере водорода при его расходе 6,7 л/мин.

Содержание работы

Во **введении** проведен обзор методов детектирования и исследования процессов химического осаждения из газовой фазы, показана значимость всестороннего рассмотрения процесса, начиная от доставки реагентов в реакционную зону, показана необходимость рассмотрения процесса подачи реагента более подробно.

Глава 1 содержит обзор систем подачи реагентов в процессах ХОГФ. Рассмотрены наиболее распространенные конструкции распылителей, их особенности, преимущества и недостатки для тех или иных условий осаждения. Сделан акцент на системах подачи перспективных для некоторых процессов ХОГФ труднолетучих жидких реагентов.

Рассмотрен процесс дробления капель в турбулентном потоке и принципиально достижимый их минимальный размер

$$d_{min} = A \cdot \rho \cdot \frac{\vartheta}{\theta}, \quad \text{где}$$

A - эмпирический коэффициент, ρ – плотность жидкости, ϑ – кинематическая вязкость жидкости, θ – поверхностное натяжение. Максимальный же размер капель определяется их устойчивостью в поле действия сил, вызывающих дробление, а также слиянием более мелких капель.

Показано, что минимальный размер диссипативных турбулентных вихрей определяется колмогоровским масштабом η_K :

$$\eta_K = (\vartheta^3 / \epsilon)^{1/4}$$

Здесь ϵ – местная скорость диссипации на единицу массы;

ϑ – кинематическая вязкость.

Рассмотрено современное состояние работ в области разработки пневматических систем подачи реагентов. Сделаны выводы о необходимости разработки принципиально нового концепта распылителя аэродинамического типа. Произведена постановка задачи исследования.

В **главе 2** рассмотрены методы математического моделирования, используемые в расчетах течения газа и жидкости. Эти методы необходимы для построения расчетной схемы течения в разрабатываемом распылителе. Рассмотрены наиболее распространенные в инженерной практике подходы к численному моделированию гидроаэродинамических явлений. Произведено сравнение различных подходов по

степени увеличения требований к вычислительным и достижимые при этом уровни разрешения процессов каскадного переноса энергии турбулентных пульсаций.

В таблице 1 приведено примерное сравнение вычислительных ресурсов, требуемых для решения типовой задачи типа наружного обтекания твердого тела со всеми сопутствующими эффектами и явлениями.

Таблица 1

Требуемые вычислительные ресурсы и готовность методов

Метод	Необходимое число узлов сетки	Необходимое число шагов по времени	Готовность для общинженерных расчетов
2D RANS нестац.	10^5	$10^{3,5}$	1980
3D RANS	10^7	10^3	1985
3D RANS нестац.	10^7	$10^{3,5}$	1995
DES	10^8	10^4	2000
LES	$10^{11,5}$	$10^{6,7}$	~2045
DNS	10^{16}	$10^{7,7}$	~2080

Как следует из этого примера, в вопросах выбора подхода к составлению численной модели следует руководствоваться не только достижимой точностью и желаемыми для учета эффектами, но и доступностью вычислительных ресурсов для разрешения задачи в полном объеме. Приводится обоснование применяемого упрощенного подхода и принимаемые допущения при расчётах, целесообразность которых проверялась последующим экспериментальным исследованием.

В главе 3 представлена разработка конструкции и аспекты исследования высокопроизводительного аэродинамического распылителя для подачи труднолетучих реагентов. Целью данного раздела являлась разработка конструкции аэродинамического распылителя на основе плоского сопла Лавалья с внутренним телом, обеспечивающего высокую производительность и возможность регулировки расхода распыляемой жидкости в широких пределах. Кроме того, для подтверждения конструкторских и проверочных расчетов планировалось экспериментальное испытание прототипа распылителя для подачи с большим расходом (до 300 мл/ч) кремнийсодержащего вещества – декаметилциклопентасилоксана, являющегося перспективным реагентом для синтеза в кислородно-водородной горелке высококачественного кварцевого стекла. Анализ литературных данных показывает, что обычно при использовании водород-кислородных горелок для синтеза кварцевого стекла из кремнийорганических реагентов применяются расходы газа в диапазоне 10-30

л/мин на каждую из горелок в зависимости от конструкции реактора. В этой связи при создании прототипа распылителя были задан расход газа-распылителя до 20 л/мин, при этом расход реагента должен обеспечиваться до 300 мл/ч.

На рис. 1 представлен разработанный распылитель в разобранном виде, представляющий собой основание 1 с каналом, внутреннее тело 2, образующее вместе с прямоугольным каналом проточную часть сопла, переходную втулку 3 и фиксирующую гайку 4. Наличие внутреннего тела упрощает подвод реагента и позволяет изменять количество подающих отверстий путем перекрытия части из них в случае необходимости, что расширяет возможности регулировки расхода распыляемого реагента в широких пределах.

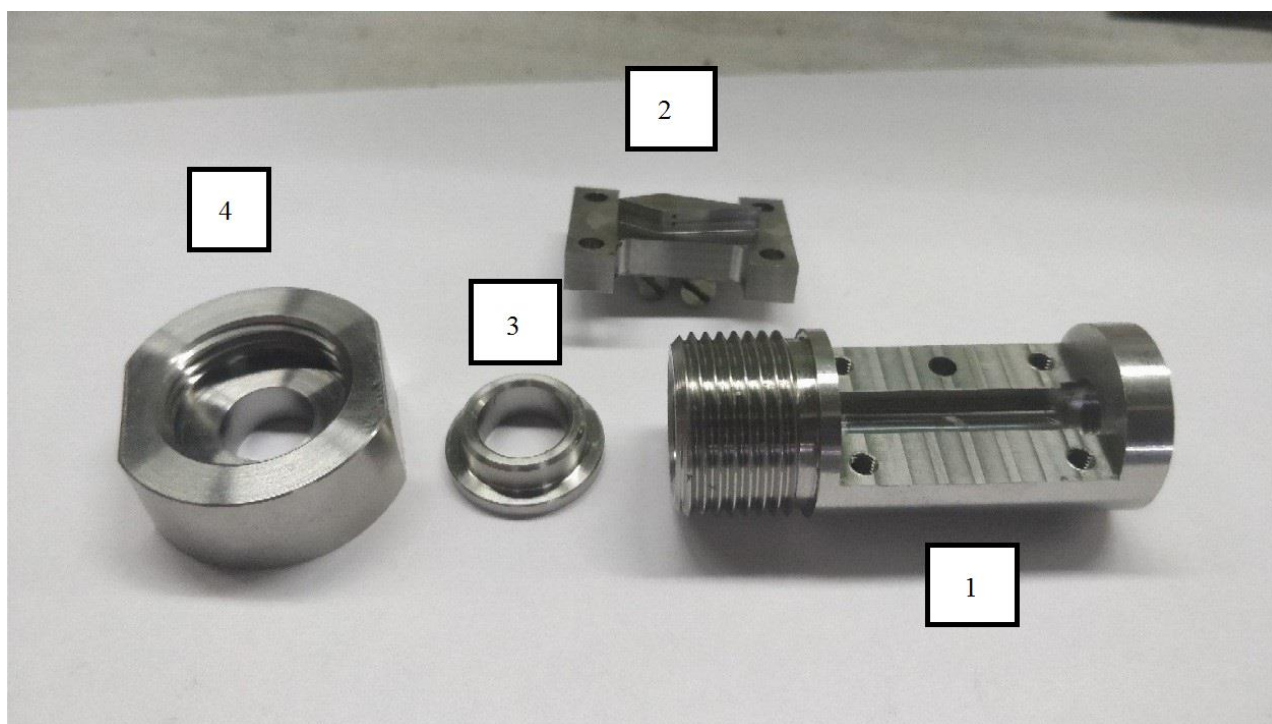


Рис. 1 – Общий вид распылителя с плоским соплом Лавала с внутренним телом.

Геометрические параметры распылителя были определены в ходе моделирования течения в нем с применением методов вычислительной гидродинамики и расчетов с использованием аналитических методик.

Спроектированная с применением аналитических зависимостей, выведенных для течения сжимаемого газа, геометрия была подвергнута необходимым перестройкам с целью улучшения стабильности подачи реагента. Изменения в проточной части повлекли за собой снижение аэродинамической эффективности (под которой следует понимать эффективность преобразования потенциальной энергии давления в скоростной напор газовой струи), которые необходимо было проконтролировать и минимизировать, что было выполнено в ходе численного моделирования.

Полученные распределения параметров потока (рис. 2-3) можно считать удовлетворительными, так как благодаря отходу от классической конструкции с криволинейными стенками, возникла зона перерасширения за скачком уплотнения, что положительно сказывается на подаче реагента, так как отверстия, подводящие реагент в поток, все время остаются внутри зоны пониженного давления, несмотря на возможные акустические колебания в потоке.

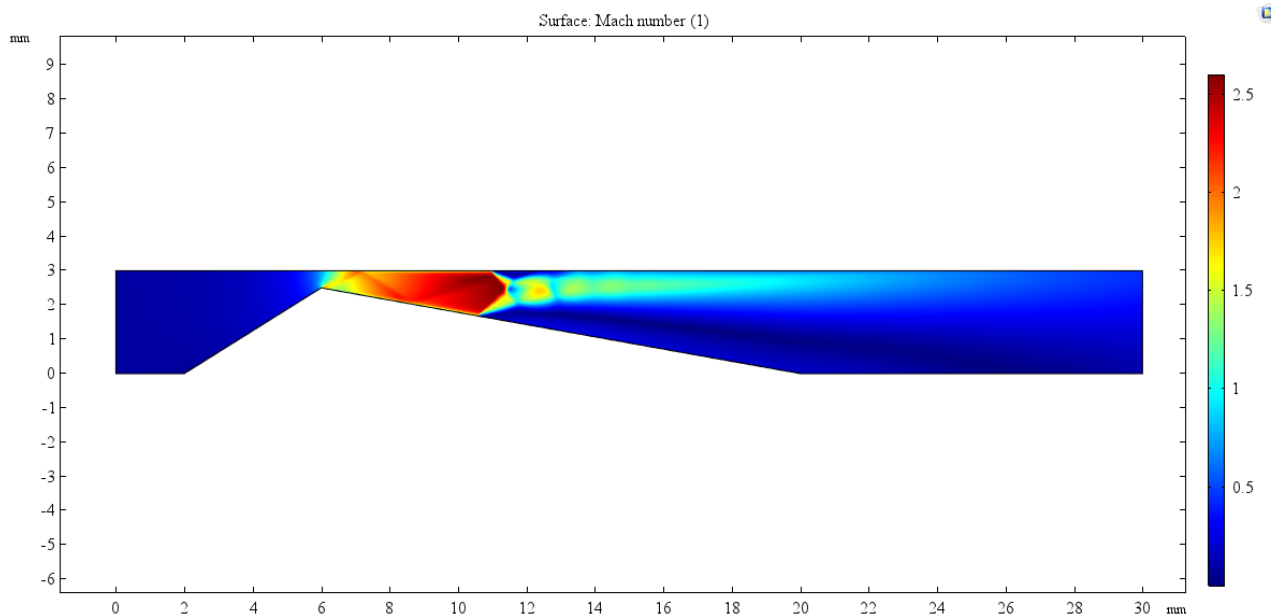


Рис. 2 – Распределение числа Маха в проточной части распылителя.

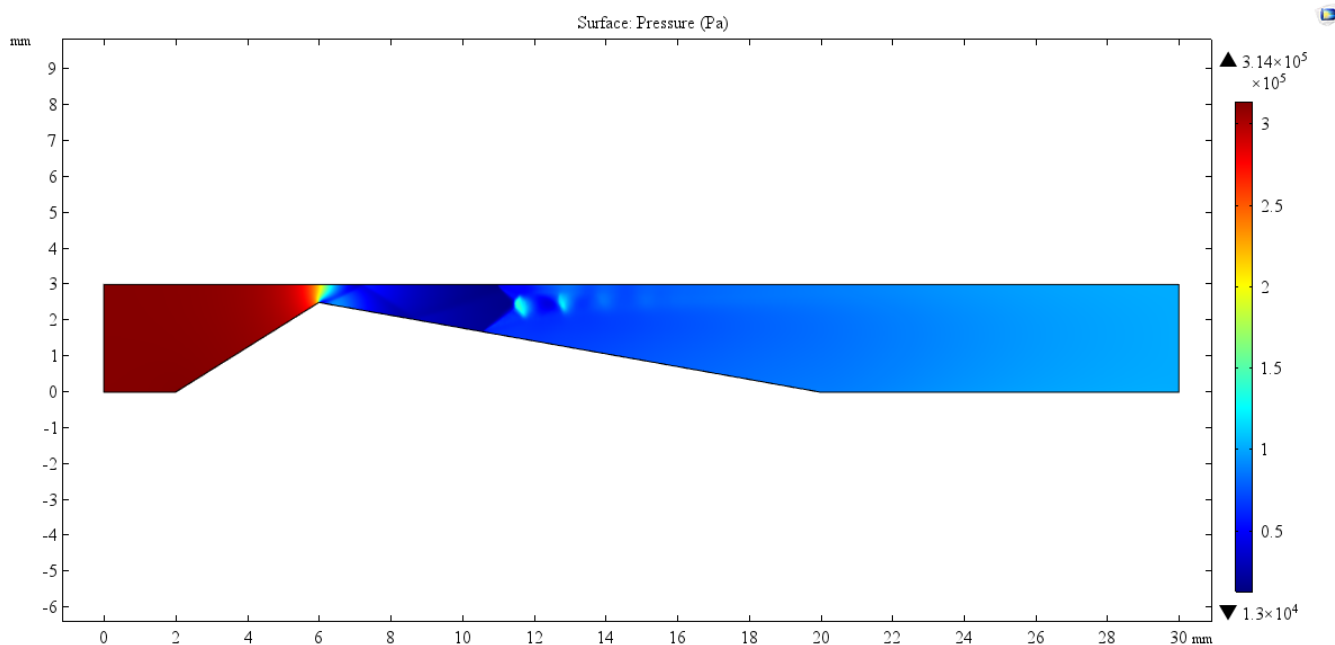


Рис.3 – Распределение статического давления в проточной части распылителя.

Полученные данные о течении газа в канале сопла были использованы для определения необходимого сечения подводящих отверстий (рис. 4), течение в подводящем канале также было смоделировано с целью минимизировать потери.

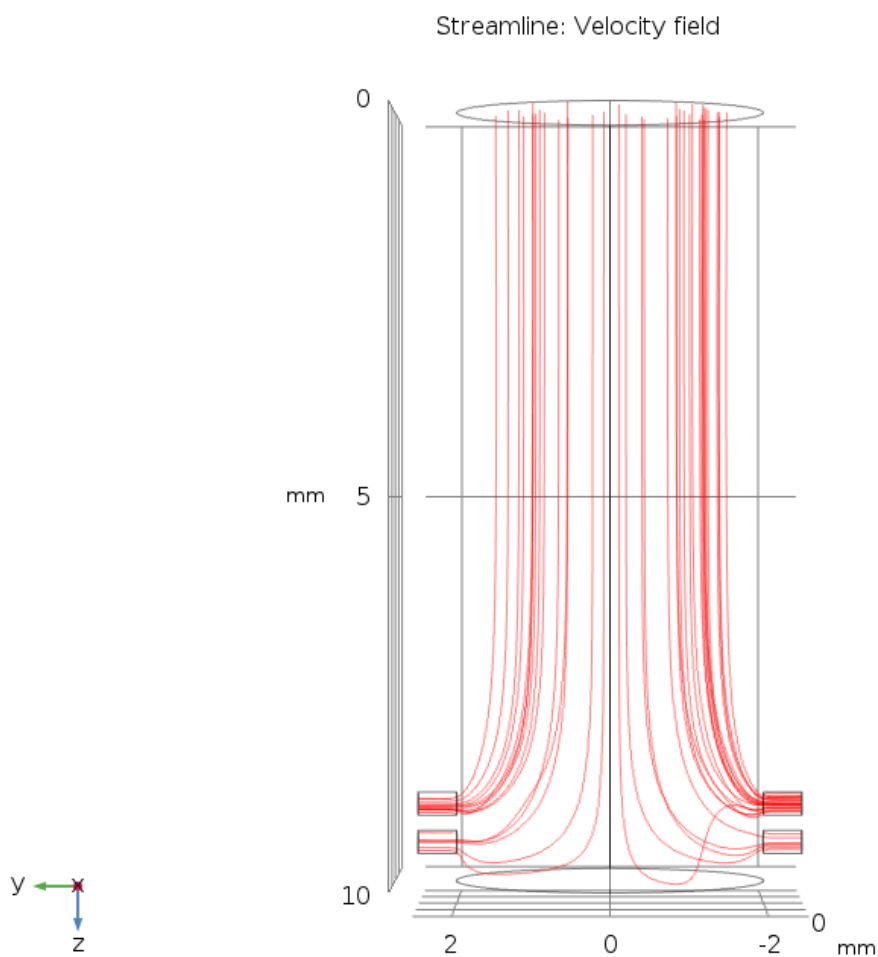


Рис. 4 – Линии тока в канале подачи реагента.

Была проведена экспериментальная проверка работоспособности распылителя на различных режимах работы. Так проверялась работоспособность при подаче воды и искусственно сниженной производительности за счет частичного перекрытия канала сопла (рис. 5-6).

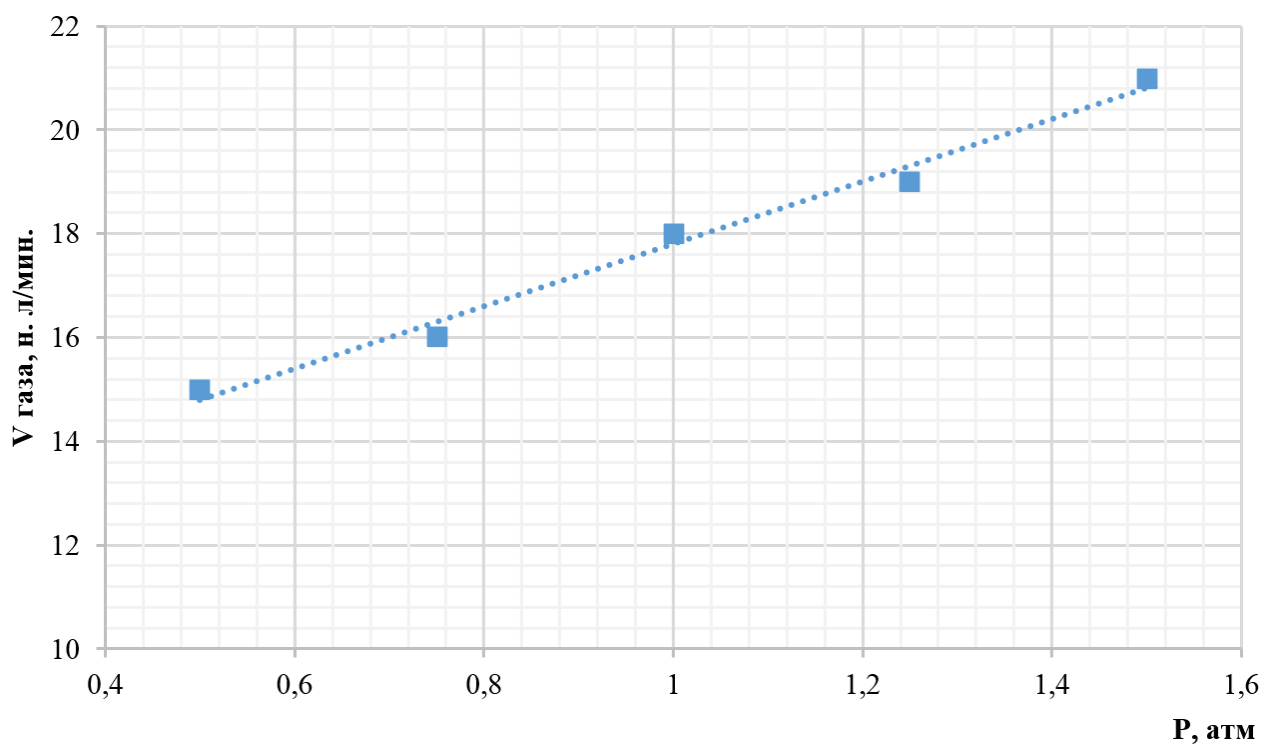


Рис. 5 – Расходная характеристика распылителя при перекрытии одного из каналов подачи газа.

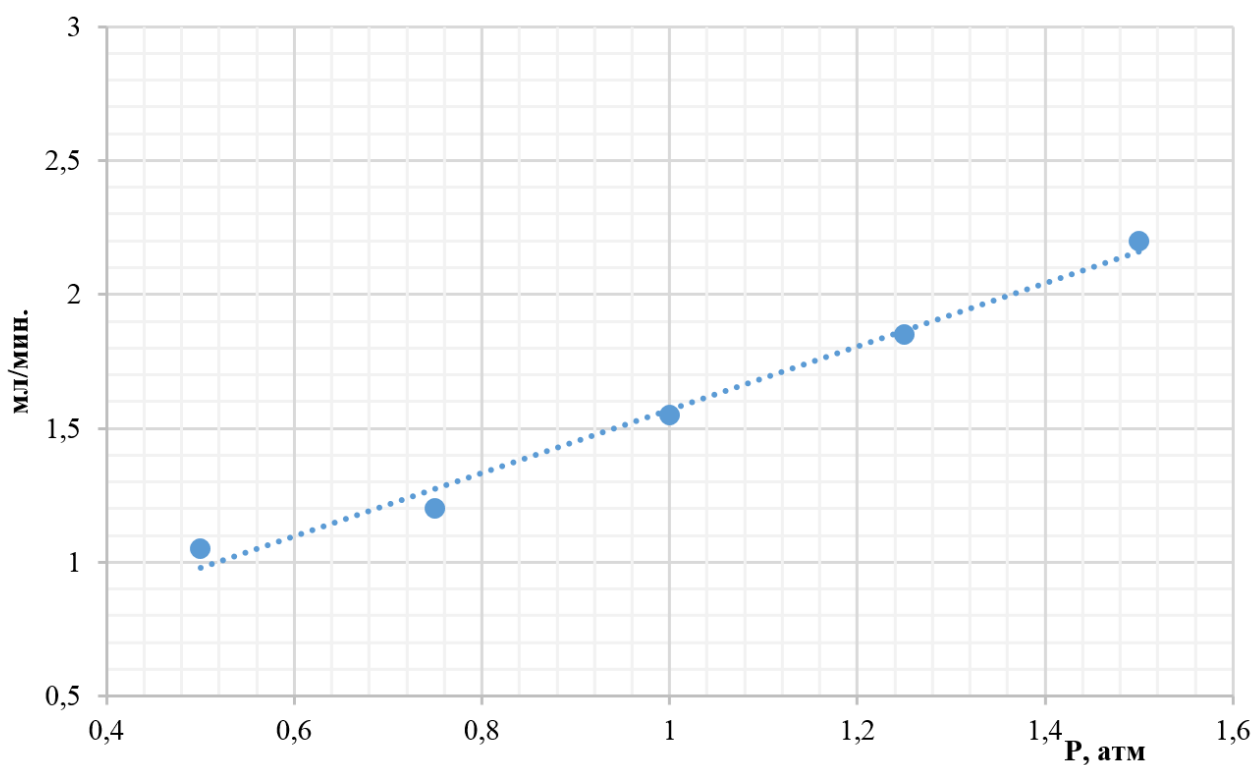


Рис. 6 – Расход воды через распылитель при работе с отключением одного канала подачи газа.

Кроме того, установлено, что из-за высокого поверхностного натяжения воды, на выходе из распылителя образуются капли достаточно большого размера (до 1 мм),

которые не могут быть разорваны относительно низкоскоростным потоком газа, однако можно ожидать, что при смене воды на реагент с меньшим поверхностным натяжением будет достигаться более качественное распыление при подобной конфигурации распылителя.

В ходе эксперимента была произведена замена воды на декаметилциклопентасилоксан при сохранении настроек подачи газа-распылителя (рис. 7), при этом распылитель продолжил работу, несмотря на значительное различие в свойствах жидкости (при комнатной температуре) поверхностное натяжение воды $73 \cdot 10^{-3}$ Н/м, вязкость 0,894 мПа·с, декаметилциклопентасилоксан при тех же условиях имеет поверхностное натяжение порядка $17 \cdot 10^{-3}$ Н/м и вязкость 1.7 Па·с). В пределах диапазона давлений и расхода газа-распылителя может быть произведена корректировка расхода газа для более качественного распыления жидкости, для чего в конструкции распылителя предусмотрено использование проставок, изменяющих критическое сечение сопла Лаваля.

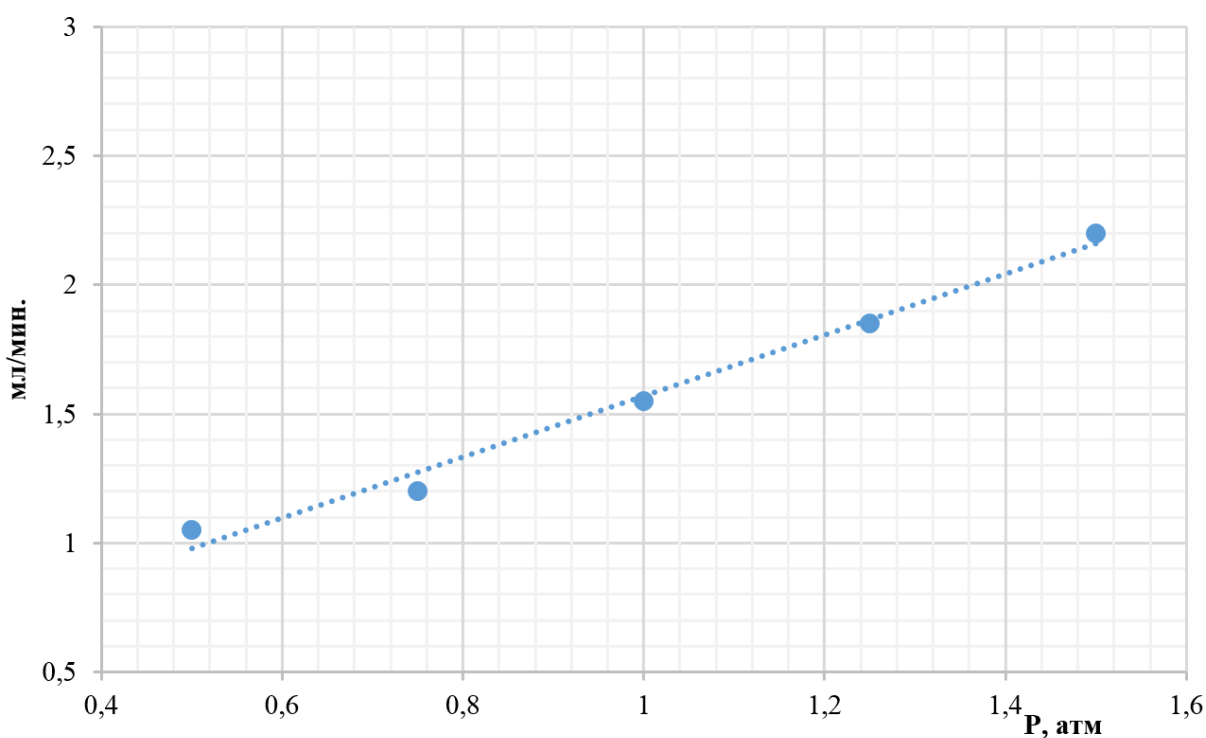


Рис. 7 – Расход декаметилциклопентасилоксана через распылитель при работе с отключением одного канала подачи газа.

Главной задачей проведенных экспериментов была экспериментальная проверка возможности достижения требуемого расхода декаметилциклопентасилоксана при ограниченном расходе и давлении газа-распылителя. Работа распылителя с уменьшенным критическим сечением сопла Лаваля и при максимальной подаче декаметилциклопентасилоксана представлена на рис. 8 и 9.

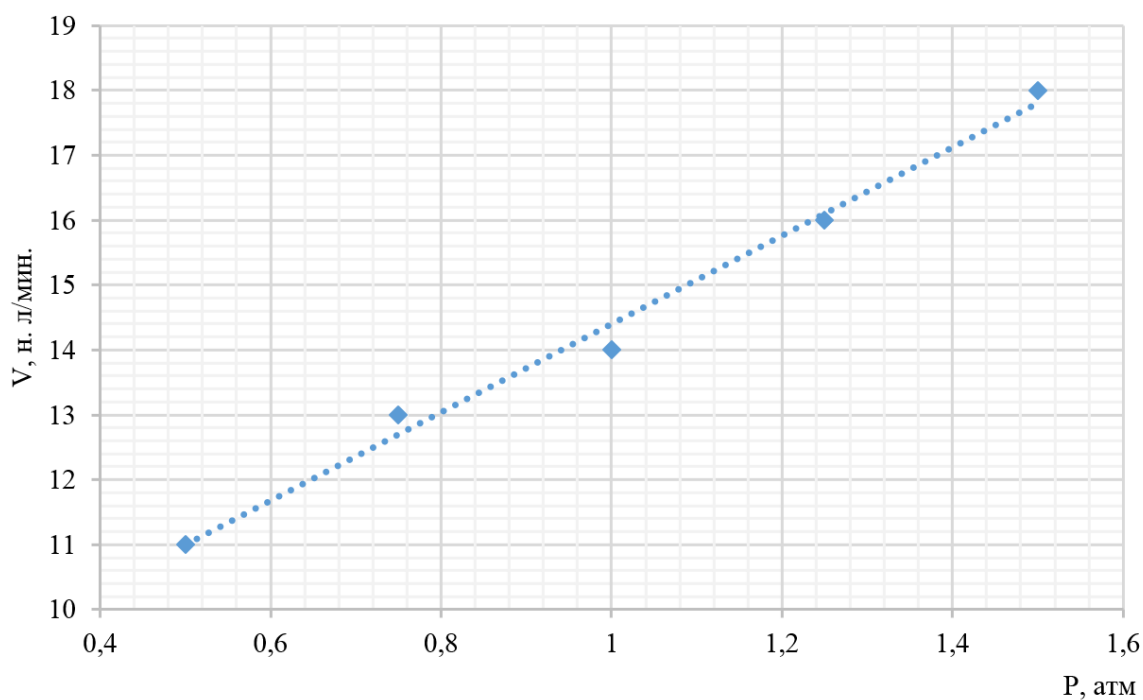


Рис. 8 – Расходная характеристика распылителя при двухсторонней подаче газа и уменьшенном критическом сечении сопла.

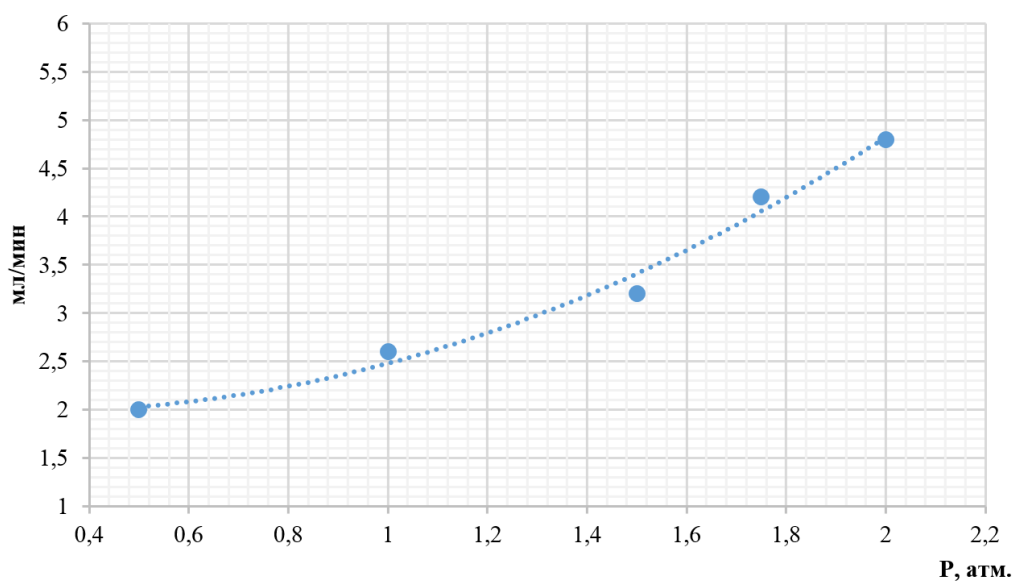


Рис. 9 – Расход декаметилциклопентасилоксана через распылитель при двухсторонней подаче газа и уменьшенном критическом сечении сопла.

Уменьшение критического сечения сопла позволило повысить разрежение в зоне подающих отверстий и тем самым увеличить количество реагента, поступающего в распылитель за счет перепада давлений. Как можно видеть из представленных данных в пределах заданных диапазонов давлений и расходов газа-распылителя был достигнут требуемый расход реагента.

Спроектированное, изготовленное и испытанное в ходе данной работы устройство подачи реагента позволяет производить распыление вязких высококипящих

реагентов для подачи в испарители или непосредственно камеры реакторов с расходами реагента до 300 мл/ч (при масштабировании устройства возможно увеличение подачи реагента до 500 мл/ч и более для крупногабаритных горелок). Универсальность устройства, достигаемая за счет легко адаптируемой геометрии проточной части под требуемый расход газа и реагента, позволяет производить распыление высококипящих вязких жидкостей (на примере декаметилциклопентасилоксана) с обеспечением требуемых расходов газа и жидкости.

Проведенные экспериментальные исследования показали правильность выбранной концепции построения распылителя и верность предварительных расчетов.

Глава 4 содержит описание конструкции, модели и расчетов испарителя, предназначенного для подачи реагента в потоке легкого газа (водорода). Для этого производится первичное распыление реагента через пористую мембрану в полость испарителя. Вспененный реагент вскипает и испаряется в атмосфере водорода при внешнем подводе теплоты. Такой способ позволяет избежать крупных капель на входе в реактор и производить подачу паров реагента. Кроме того, защитная атмосфера водорода защищает реагент от окисления. Расчет необходимой мощности нагревателей, а также конфигурация проточной части производились при помощи численной модели течения двухфазного потока (рис.10).

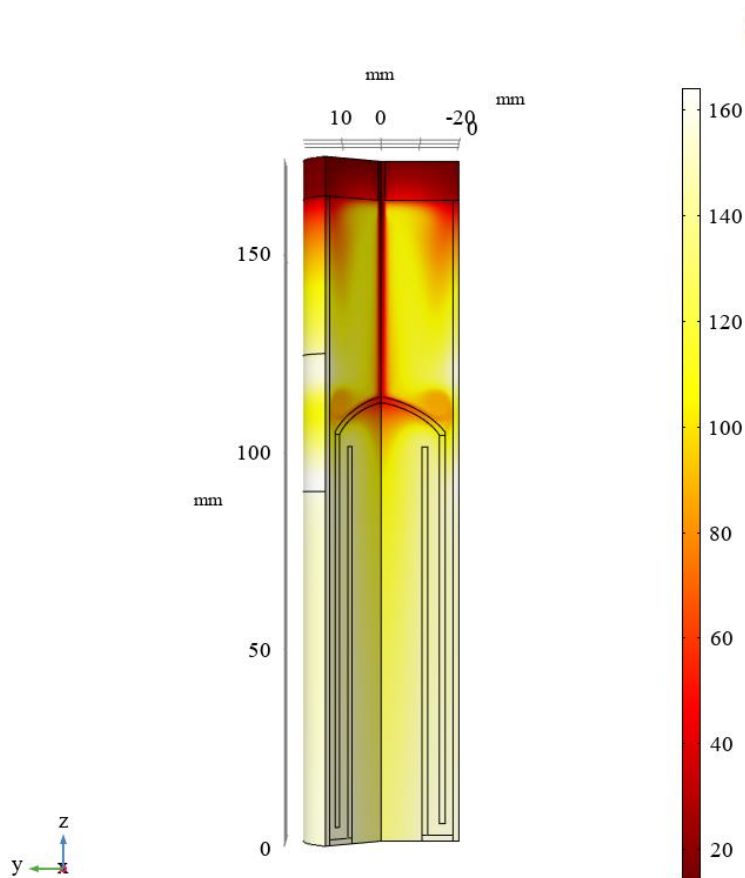


Рис. 10 – Поле температур в испарителе при работе на номинальном режиме.

Для оценки корректности расчетов было проведено измерение мощности и оценка качества работы испарителя на прототипе в лабораторных условиях. Данные сравнения температур и мощностей в контрольных точках представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений температур в контрольных точках на стенках испарителя и мощности нагревателей

	Нагреватель 1	Δ_1 , %	Нагреватель 2	Δ_1 , %	Нагреватель 3	Δ_1 , %
$t^\circ\text{C}$, расчет	140	3,5	130	3,7	160	9,3
$t^\circ\text{C}$, эксперимент	135		135		145	
P, Вт расчет	47	7,8	35	7,7	70	8,5
P, Вт эксперимент	51		32,5		76,5	

Данные, полученные в ходе эксперимента достаточно хорошо согласуются с численной моделью. Испаритель стабильно подавал реагент без его перегрева и пульсаций в подаче. Конструкция испарителя с поворотами потока и коаксиальными каналами получилась достаточно компактной.

В главе 5 приведены некоторые возможности использования численных моделей при согласовании работы испарителя или распылителя и реактора. Приводятся методы моделирования различных взаимодействий (броуновского движения частиц, термофореза и др.) как в отдельности, так и совместно с оценкой вклада каждого из эффектов в движение частиц аэрозоля и осаждаемых материалов. Также приводятся способы упрощенного задания требуемых взаимодействий, предварительно оцененных на тестовых задачах. Был проведен тестовый расчет на произвольной геометрии реактора с целью показать эффект от неучтенных взаимодействий, оказываемый на процесс осаждения на горячую подложку. Используемые в ходе моделирования процесса подачи подходы и методы, а также получаемые данные могут с успехом использоваться для предварительного моделирования теплофизических процессов в реакторе ХОГФ для того, чтобы создать требуемые для правильного протекания химических реакций пространственные распределения параметров потока.

В **заключении** описано, что ходе работы было проведено численное моделирование работы распылителя и испарителя для подачи декаметилциклопентасилоксана в водород-кислородную горелку. Было проведено экспериментальное исследование работы испарителя и распылителя в отдельности. Натурные испытания распылителя показали универсальность в плане подачи жидкостей с значительно различающимися свойствами, а также широкие возможности настройки расхода как газа, так и жидкости. Сравнение результатов численного моделирования с температурами в контрольных точках и мощностями нагревателей показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, что доказывает применимость упрощенных моделей, при условии их надлежащей настройки, даже для расчетов сложных течений. Разработанные, исследованные численно и на макетных образцах устройства позволяют осуществлять подачу высококипящих реагентов в реакторы ХОГФ с высокими уровнями расхода реагента и минимальным его загрязнением и перегревом.

**Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной
работы (диссертации)**

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

1. Клейманов Р.В. Аэродинамический высокопроизводительный распылитель жидких реагентов на основе сопла Лавалья / Клейманов Р.В., Александров С.Е. // Наноиндустрия. Том 13 № 5 (98) 2020. С. 22-32

Публикации в других изданиях

2. Клейманов Р.В. Высокотемпературный диэлектрический одноточечный цилиндрический зонд для измерения полного давления и угла потока / Клейманов Р.В. Ситкин П.К., Коршунов А.В. // В сборнике: «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» Материалы XXI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках.
3. Клейманов Р.В. Моделирование газодинамических процессов при синтезе дисульфида молибдена методом CVD / Клейманов Р.В. Кантюков А.Д. // В сборнике: НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. 2016. С 86-88.
4. Высокотемпературный одноточечный цилиндрический зонд для измерения полного давления и угла потока. / Ситкин П.К., Клейманов Р.В., Коршунов А.В., Киселев И.Н., Милосердов Е.Г. // В сборнике: НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. 2016. С. 93-95.

Аспирант _____ **ФИО**

(подпись)