



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«Дальневосточный федеральный университет»

Инженерная школа

Кафедра инженерных систем зданий и сооружений

Ким Марина Игоревна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА НА
ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАКЕЛА ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

по образовательной программе подготовки магистров
по направлению подготовки
08.04.01 «Строительство»
«Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий»

**г. Владивосток
2018**



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»

ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

Кафедра инженерных систем зданий и сооружений

З А Д А Н И Е

на выпускную квалификационную работу магистра
студентке **Ким Марине Игоревне** группы **М32196**
(фамилия, имя, отчество)

на тему: **Исследование влияния избыточного давления воздуха на характеристики факела гидравлической форсунки**

Вопросы, подлежащие разработке (исследованию):

1. Обзор существующих способов распыливания жидкости. Выбор способа распыливания для проведения эксперимента.
2. Теоретическое исследование особенностей гидравлического распыливания жидкости центробежно-струйной и ударно-струйной форсунками
3. Разработка экспериментальной установки и методики проведения эксперимента по определению изменения корневого угла факела. Обработка результатов эксперимента.
4. Компьютерное моделирование процесса распыливания жидкости

Перечень графического материала:

- Чертежи экспериментальной установки;
- Фотографии экспериментальной установки и изменения корневого угла факела;
- Графики отражающие изменение корневого угла факела в зависимости от давления воздуха в напорном резервуаре.

Основные источники информации и прочее, используемые для разработки темы
Патент RU№2593257, научно-техническая литература по теме исследования.

Срок представления работы « 25 » _____ июня _____ 2018 г.

Дата выдачи задания « 19 » _____ июня _____ 2017 г.

Руководитель ВКР _____
(должность, уч.звание)

_____ (подпись)

_____ Г.А. Захаров
(и.о.ф)

Задание получил _____

_____ (подпись)

_____ М. И. Ким
(и.о.ф)



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»

ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА

Кафедра инженерных систем зданий и сооружений

ГРАФИК

подготовки и оформления выпускной квалификационной работы

студентке **Ким Марине Игоревне**

группы **М32196**

на тему: **Исследование влияния избыточного давления воздуха на характеристики факела гидравлической форсунки**

№ п/п	Выполняемые работы и мероприятия	Срок выполнения	Отметка о выполнении
1.	Ознакомление с заданием	19.06.2017 – 26.06.2017	
2.	Исследование способов распыла. Теория распыла жидкости.	27.06.2017 – 25.07.2017	
3.	Разработка экспериментальной установки и методики проведения эксперимента	26.07.2017 – 23.08.2017	
4.	Проведение экспериментальных исследований	24.08.2017 – 21.09.2017	
5.	Обработка результатов эксперимента	22.09.2017 – 20.11.2017	
6.	Компьютерное моделирование	21.11.2017 – 18.01.2018	
7.	Написание главы 1 «Аналитический обзор способов распыливания жидкости»	19.01.2018 – 15.02.2018	
8.	Написание главы 2 «Теория распыливания жидкости ударно-струйными и центробежно-струйными форсунками»	16.02.2018 – 16.03.2018	
9.	Написание главы 3 «Влияние избыточного давления на корневой угол факела. Планирование и обработка данных эксперимента»	17.03.2018 – 14.04.2018	
10.	Написание главы 4 «Моделирование распыла жидкости»	15.04.2018 – 12.05.2018	
11.	Оформление ВКР	13.05.2018 – 25.06.2018	

Руководитель ВКР доцент, к.т.н.
(должность, уч. звание)

_____ (подпись)

Г.А. Захаров
(и.о.ф)

Задание получил

_____ (подпись)

М. И. Ким
(и.о.ф)

Оглавление	
АННОТАЦИЯ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОСТИ.....	4
1.1. Использование распыливания в различных отраслях промышленности	4
1.2. Классификация способов распыливания жидкостей.....	11
1.3. Гидравлическое распыливание	15
1.3.1. Классификация гидравлических форсунок.....	16
1.3.2. Распад пленок и струй при гидравлическом распыливании	18
1.4. Цели и задачи исследования	22
Глава 2. ТЕОРИЯ РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОСТИ УДАРНО-СТРУЙНЫМИ И ЦЕНТРОБЕЖНО-СТРУЙНЫМИ ФОРСУНКАМИ	23
2.1. Характеристики газожидкостного факела	23
2.2. Распределение распыленной жидкости в факеле[2]	35
2.3. Размеры капель при распыливании	43
2.4. Изменение диаметра капель	56
Глава 3. ВЛИЯНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА КОРНЕВОЙ УГОЛ ФАКЕЛА. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА	60
3.1. Анализ факторов влияющих на корневой угол факела.	60
3.2. Общие положения планирования второго порядка	62
3.3. Ортогональное центральное композиционное планирование	66
3.4. Методика проведения эксперимента.....	72
3.5. Обработка эксперимента с использованием форсунки WL3-60.....	75
3.6. Обработка эксперимента с использованием форсунки TF8	82
Глава 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА ЖИДКОСТИ	88
Для уточнения результатов эксперимента необходимо разработать расчетную 3D модель и выполнить численное компьютерное моделирования процесса распыливания жидкости.	88
4.1. О программном пакете Comsol Multiphysics	88
4.2. Компьютерное моделирование процесса распыливания жидкости.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
Список использованных источников	97

АННОТАЦИЯ

Работа направлена на исследование влияния избыточного давления воздуха на характеристики факела гидравлических форсунок.

В первой главе выполнен обзор существующих способов распыливания жидкости. Подобран способ распыливания для проведения эксперимента – гидравлическое распыливание центробежно-струйной и ударно-струйной форсунками. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе проведено теоретическое исследование гидравлического распыливания жидкости центробежно-струйной и ударно-струйной форсунками. Описано распределение жидкости в факеле. Выполнен расчет по определению среднего диаметра капель при распыливании.

В третьей главе проведен анализ факторов, влияющих на корневой угол факела. Описана экспериментальная установка, а также методика проведения и обработки результатов эксперимента, приведены результаты экспериментального исследования влияния избыточного давления в напорном резервуаре и температуры очищаемой жидкости на корневой угол факела.

В четвертой главе выполнено компьютерное моделирование процесса распыливания жидкости. Подтверждены экспериментальные данные о влиянии избыточного давления на корневой угол факела.

По результатам работы получены аппроксимирующие зависимости, описывающие изменения корневого угла факела центробежно-струйной и ударно-струйной форсунок в зависимости от избыточного давления в напорном резервуаре и температуры жидкости, а так же расчетная 3D модель, созданная на основе реальных размеров и строения экспериментальной установки.

Работа выполнена на 101 странице, содержит 55 рисунков, 15 таблиц, 42 источника литературы.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время технологии распыливания применяют в различных областях промышленности. Распылительные форсунки имеют широкие функциональные возможности: они подходят для чистки, охлаждения, нанесения покрытий, увлажнения, смазки, впрыска, сушки и других задач. Столь распространенное применение распыливания объясняется тем, что во всех этих процессах уменьшение размеров капель резко сокращает время протекания процесса, что приводит к значительному увеличению эффективности процесса. Кроме этого, распыливание обеспечивает большую равномерность распределения жидкости и лучшее взаимодействие ее с реагирующей средой.

В ряде случаев распыливание жидкости осуществляется под избыточным противодавлением газовой фазы. На сегодняшний день процесс распыливания под избыточным давлением, исследуется в основном при распыливании топлив в дизельном двигателе – при значительном давлении воздуха (более 20 бар) и небольшом расходе жидкости. Целью данной работы является исследование влияния малых значений избыточного давления воздуха (до 5 бар) на гидродинамические характеристики факела форсунки.

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОСТИ

1.1. Использование распыливания в различных отраслях промышленности

Распылительное оборудование используется во множестве технологических процессов и операций. Распылительные форсунки имеют широкие функциональные возможности. Внедрение новых технологических процессов в различных отраслях промышленности сопровождается заметным расширением области применения распылительных устройств. При этом важное, если не решающее, значение имеет использование наиболее эффективных распылителей, позволяющих увеличить эффективность процесса. На сегодняшний день распыливание жидкостей находит наибольшее применение в таких отраслях промышленности как:

- электронная промышленность;
- топливная промышленность;
- медицина;
- нанотехнологии;
- химическая промышленность;
- теплоэнергетика;
- очистка сточных вод.

Распыливание жидкостей в радиоэлектронной промышленности

В радиоэлектронной промышленности технологии распыливания жидкостей применяются для распыливания паяльных флюсов, нанесения покрытий на печатные платы и др. В частности применение распыливания обеспечивает значительные преимущества по сравнению с другими методами нанесения паяльного флюса, выражающиеся в точности и селективности нанесения флюса только на места пайки компонентов, а также в возможности флюсования сквозных отверстий на печатных платах [25]. Жидкость, проходящая через форсунку, распыляется в мягкий низкоскоростной факел, в результате чего

минимизируется излишнее напыление. Среди главных преимуществ распыливания можно отметить следующие:

- исключается излишнее нанесение флюса;
- распыленный флюс легко формируется в вертикально ориентированный факел, создавая равномерное покрытие на печатной плате;
- широкий диапазон регулировки подачи флюса (т.е. плотности его нанесения на печатную плату).

Распыливание жидкостей при производстве топливных элементов

Распыливание применяют для нанесения различных покрытий на подложки широкого круга топливных элементов, включая электроды, различные электролитические материалы, твердооксидные топливные элементы (SOFCs), проводящие материалы, основанные на платине, никеле, Ir, Ru или других ценных металлах. Распыливание позволяет наносить покрытия равномерным тонким слоем, сохраняет пористость электрода и не препятствуют транспорту реагентов. Кроме того, высока потребность в технологии напыления полимерных покрытий, основанных, например, на политетрафторэтилене, для повышения гидрофильных или гидрофобных свойств в электротических процессах и элементах [25].

Применение технологии распыливания жидкостей в медицине

Технологии, основанные на распыливании жидкостей, применяются в медицинской практике уже сравнительно давно. К ним относятся, прежде всего, распыливание лекарственных составов для ингаляций и физиопроцедур, распыливание эфирных масел. Сравнительно новой областью применения распылителей является дезинфекция помещений, техники и инструмента. В настоящее время один из основных методов дезинфекции помещений – протирание ветошью и орошение с использованием различных ручных распылителей. Недостатком данного метода является значительный расход дезинфицирующих средств и времени. В последнее время в медицинских учреждениях стали использовать дополнительный способ дезинфекции – аэрозольный. Существенный плюс этого способа – обеспечение 100%-ной обработки всех поверхностей, в том числе труднодоступных мест. Кроме того,

аэрозоль при распыливании в помещении обеззараживает не только окружающие поверхности, но и воздух. Для этих целей необходимы компактные, переносные распылители, обеспечивающие получение аэрозолей с размеров распыляемых капель от 5 до 50 микрон, в зависимости от цели обработки (воздух, поверхности, насекомые). Кроме того, технологии, основанные на мелкодисперсном распыливании незаменимы для профилактики инфекционных заболеваний в детских садах, школах, гостиницах, общежитиях, в целях борьбы с особо опасными инфекциями в аэропортах, вокзалах, на железнодорожном транспорте, в местах массового скопления людей, проведения мероприятий по борьбе с синантропными насекомыми. Производство современного медицинского оборудования и препаратов также невозможно без применения распыливания.

Сюда входят:

- нанесение покрытий на стенды и другие имплантируемые медицинские устройства;

- нанесение покрытий на шприцы и оборудование для сбора крови;

- изготовление микрокапсул, содержащих лекарственные препараты;

- нанесение специальных (дезинфицирующих) покрытий на хирургический шовный материал, бинты, марли и много другое [25].

Применение распыливания жидкостей в области нанотехнологий

Мелкодисперсное распыливание находит широкое применение при производстве современных наноматериалов. Наиболее востребованной областью его применения является распылительная сушка наноматериалов. Сушка обладает уникальными преимуществами, включая деагломерацию наночастиц из водных растворов, содержащих наноматериалы, таких как металлические оксиды и углеродные нанотрубки. При этом только ультразвуковое распыливание способно обеспечить требуемую для nanoиндустрии производительность распыливания и размеры частиц (в диапазоне 150–300 нм). Помимо распылительной сушки наночастиц, существует еще целый спектр технологических процессов, основанных на распыливании:

- изменения структуры наночастиц;

- изменения размера наночастиц;
- сушка суспензий;
- агломерации наночастиц;
- микроинкапсуляция и нанесение покрытий на частицы [25].

Распыливание жидкостей в технологиях химической промышленности

Достаточно большое количество процессов химической технологии основано на использовании распыливания, такие как: нанесение самоочищающихся покрытий, нанесение ароматических, вкусовых и смазочных покрытий, нанесение различных растворителей и клеев.

Известно, что распыливание является одним из наиболее эффективных способов увеличения поверхности взаимодействия веществ [25]. В области химической промышленности это свойство используется в таких процессах как: мокрая очистка газов от дисперсных примесей; очистка и разделение газов, распылительная сушка, распыливание в камерах для ускорения химических процессов, распыл топлив.

Мокрую очистку газов применяют для очистки газов от пыли или тумана. В качестве промывочной жидкости обычно используют воду, реже – водные растворы соды, серной кислоты и других веществ.

Распыливание жидкости в теплоэнергетике

Применение распыливающих устройств находит применение повсюду, где могут быть использованы нефтепродукты пригодные для сгорания. При сгорании нефтепродуктов образуются газы, состоящие главным образом из двуокиси углерода, водяного пара и азота, которые химически неактивны и не оставляют золы. По этой причине топливные форсунки и горелки могут применяться в процессах тонкой химической технологии, связанных с подводом теплоты.

Распыливание жидкости в системах очистки сточных вод

Коллективом кафедры инженерных систем зданий и сооружений Дальневосточного федерального университета разработана установка для очистки нефтесодержащих и сточных вод (рис. 1.1), в которой осуществляется распыл жидкости под избыточным давлением [42].

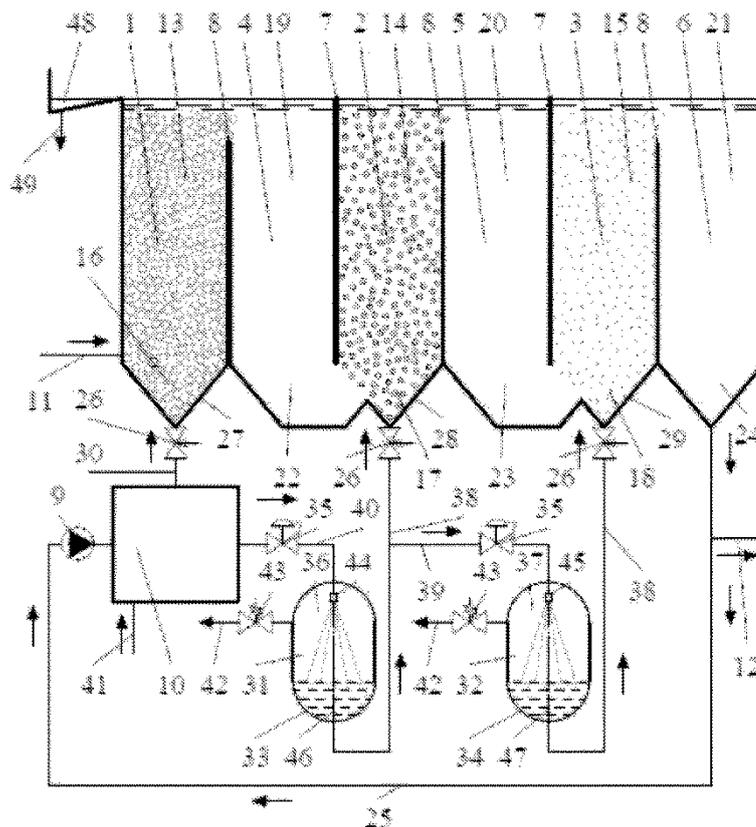


Рисунок 1.1 – Установка для очистки нефтесодержащих и сточных вод

Изобретение относится к системам очистки воды и может быть использовано для очистки нефтесодержащих и сточных вод на нефтеперерабатывающих и нефтедобывающих комплексах, в энергетике, в пищевой промышленности и т.п.

Задача, на решение которой направлено заявленное изобретение, заключается в повышении эффективности очистки нефтесодержащих сточных вод от тонкодисперсных примесей напорной флотацией.

Установка работает следующим образом.

Очищаемую воду подают в придонную часть 16 флотореактора 1 первой ступени очистки по трубопроводу подвода очищаемой воды 11. Очищенную воду из придонной части 24 флоторазделителя 6 третьей ступени очистки подают с помощью насоса 9 в аэрирующий узел 10. В аэрирующем узле 10 происходит, согласно любому известному способу, насыщение жидкости воздухом при давлении 0,3-0,6 МПа, для чего к аэрирующему узлу 10 предусмотрен подвод сжатого воздуха через патрубок 41. Часть аэрированной воды поступает через

дросселирующий клапан 26 во вход в флотореактор 1, расположенный в нижней точке его днища 27, по трубопроводу подвода аэрированной воды 30. Причем при прохождении аэрированной воды через дросселирующий клапан 26 ее давление снижается до гидростатического и в трубопроводе подвода аэрированной воды 30 не образуются зародышевые пузырьки, что позволяет снизить их коалесценцию. Как следствие, зародышевые пузырьки образуются и равномерно распределяются по днищу 27 флотореактора 1, за счет того, что площадь поперечного сечения днища 27 флотореактора 1 равномерно уменьшается по направлению сверху вниз. Всплывая от придонной 16 к верхней 13 части флотореактора 1, зародышевые пузырьки со средним диаметром 70 мкм захватывают наиболее крупные частицы загрязнений и выносят их на поверхность воды в виде флотопены. После окончания обработки зародышевыми пузырьками во флотореакторе 1, вода из верхней части 13 флотореактора 1 поступает в верхнюю часть 19 флоторазделителя 4 и далее движется к его придонной части 22. Из аэрирующего узла 10 часть воды по трубопроводу отвода аэрированной воды 40 через первый регулятор давления 35 поступает в верхнюю часть 36 деаэрирующего узла 31 второй ступени очистки. При прохождении воды через первый регулятор давления 35 происходит снижение давления насыщения до средней величины (0,3-0,2 МПа) и из очищаемой воды начинает выделяться часть растворенного в ней воздуха. При распыле очищаемой жидкости в полости деаэрирующего узла 31 с помощью форсунки 44 происходит интенсификация процесса десорбции, при этом выделившийся воздух выводится по патрубку отвода 42 через предохранительно сбросной клапан 43, настроенный на ту же величину избыточного давления, что и регулятор давления 35, а деаэрированная вода скапливается в придонной части деаэрирующего узла 31. Часть воды, прошедшей деаэрацию в деаэрирующем узле 31, по трубопроводу подвода деаэрированной воды 38 поступает через дросселирующий клапан 26 во вход в флотореактор 2, расположенный в нижней точке его днища 28. Как следствие, зародышевые пузырьки образуются и равномерно распределяются по днищу 28 флотореактора 2, за счет того, что площадь поперечного сечения днища 28

флотореактора 2 равномерно уменьшается по направлению сверху вниз. Всплывая от придонной 17 к верхней 14 части флотореактора 2, зародышевые пузырьки со средним диаметром 57-45 мкм захватывают более мелкие, по сравнению с первой ступенью очистки, частицы загрязнений и выносят их на поверхность воды в виде флотопены. После окончания обработки зародышевыми пузырьками во флотореакторе 2, вода из верхней части 14 флотореактора 2 поступает в верхнюю часть 20 флоторазделителя 5 и далее движется к его придонной части 23. Другая часть жидкости, прошедшей деаэрацию в деаэрирующем узле 31, по трубопроводу подвода воды на деаэрацию 39 через второй регулятор давления 35 поступает в верхнюю часть 37 деаэрирующего узла 32 третьей ступени очистки. При прохождении воды через второй регулятор давления 35 происходит снижение давления насыщения до минимальной величины (0,2-0,1 МПа) и из очищаемой воды начинает выделяться часть растворенного в ней воздуха. При распыле очищаемой жидкости в полости деаэрирующего узла 32 с помощью форсунки 45 происходит интенсификация процесса десорбции, при этом выделившийся воздух выводится по патрубку отвода 42 через предохранительно сбросной клапан 43, настроенный на ту же величину избыточного давления, что и второй регулятор давления 35, а деаэрированная вода скапливается в придонной части деаэрирующего узла 32. Часть жидкости, прошедшей деаэрацию в деаэрирующем узле 32, по трубопроводу подвода деаэрированной воды 38 поступает через дросселирующий клапан 26 во вход в флотореактор 3, расположенный в нижней точке его днища 29. Как следствие, зародышевые пузырьки образуются и равномерно распределяются по днищу 29 флотореактора 3, за счет того, что площадь поперечного сечения днища 29 флотореактора 3 равномерно уменьшается по направлению сверху вниз. Всплывая от придонной 18 к верхней 15 части флотореактора 3, зародышевые пузырьки со средним диаметром 45-30 мкм захватывают самые мелкие частицы загрязнений и выносят их на поверхность воды в виде флотопены. После окончания обработки зародышевыми пузырьками во флотореакторе 3, вода из верхней части 15 флотореактора 3 поступает в

верхнюю часть 21 флоторазделителя 6 и далее движется к его придонной части 24. Далее часть очищенной воды выводится из установки по трубопроводу отвода очищенной воды 12, часть подается в аэрирующий узел 10 с помощью насоса 9 по трубопроводу подвода воды на аэрацию 25, а частицы загрязнений всех ступеней очистки, скопившиеся на поверхности воды в виде флотопены, собирают в приемник флотопены 47 и удаляют через патрубок отвода флотопены 48.

Далее цикл повторяется.

Заявляемое техническое решение обеспечивает повышение эффективности очистки нефтесодержащих сточных вод. Однако для проектирования деаэрирующих узлов 31 и 32 необходимо знать зависимость корневого угла факела от давления воздуха.

1.2. Классификация способов распыливания жидкостей

Современная классификация способов распыливания жидкостей изложена в работах [1- 4, 6]. Все существующие способы распыливания можно разделить на гидравлическое распыливание, механическое, пневматическое, акустическое, электростатическое, ультразвуковое, пульсационное, распыливание с предварительным газонасыщением, электрогидравлическое и комбинированные методы распыливания.

Гидравлическое распыливание [12, 13]. Данный способ распыливания основан на диспергировании жидкости за счет гидравлического давления, создаваемого сжатым воздухом в сети или при работе центробежных насосов. Проходя через распыливающее устройство, жидкостный поток приобретает довольно высокую скорость и преобразуется в форму, способствующую быстрому и эффективному распаду. Гидравлическое распыливание является самым экономичным по потреблению энергии (2 – 4 кВт на диспергирование 1 т жидкости), но создаваемый при этом распыл довольно грубый и неоднородный, затруднены регулирование расхода при заданном качестве дробления, а также распыливание высоковязких жидкостей.

Механическое распыливание [11]. При этом способе жидкость получает энергию вследствие трения о быстровращающийся рабочий элемент. Приобретая вместе с рабочим элементом вращательное движение, жидкость под действием центробежных сил срывается с распылителя и дробится на капли. Получаемый при этом распыл характеризуется более высокой монодисперсностью, чем при гидравлическом распыливании.

Достоинствами данного способа являются возможность распыливания высоковязких и загрязненных жидкостей и регулирования производительности распылителя без существенного изменения дисперсности. Недостатком является то, что вращающиеся распылители дороги, сложны в изготовлении и эксплуатации, энергоемки (15 кВт на диспергирование 1 т жидкости).

Пневматическое распыливание [9, 10]. При таком способе диспергирования энергия подводится к жидкости в результате динамического взаимодействия ее с высокоскоростным потоком газа (распыливающего агента). Благодаря большой относительной скорости потоков в распылителе или за его пределами жидкость сначала расслаивается на отдельные нити, которые затем распадаются на капли.

К достоинствам пневматического способа относятся небольшая зависимость качества распыливания от расхода жидкости, надежность в эксплуатации, возможность распыливания высоковязких жидкостей. Недостатками являются повышенный расход энергии на распыливание (50 – 60 кВт на 1 т жидкости), необходимость в распыливающем агенте и в оборудовании для его подачи.

Акустическое распыливание. В зависимости от способа подвода энергии акустических колебаний к зоне распыливания различают два вида распыливания: через газ и через жидкость [8].

Акустическое распыливание с подводом колебаний через газ [14, 15]. Данный способ распыливания схож с пневматическим. Жидкость получает энергию при взаимодействии с потоком газа, но в отличие от пневматического распыливания, газу сообщаются колебания ультразвуковой частоты, что обеспечивает более тонкое и однородное дробление. Данный способ

распыливания более экономичен и перспективен по сравнению с пневматическим, однако конструкции акустических распылителей несколько сложнее, чем пневматических [3, 4].

На сегодняшний день так и не сложились четкие представления о механизме воздействия колебаний газовой среды на разрушение пленки жидкости или струи, которая вытекает из акустической форсунки. По мнению одних исследователей, распыливание возникает за счет образования капиллярных волн на поверхности жидкости, вершины которых при определенной амплитуде отрываются от поверхности жидкости в виде капель. Другие авторы объясняют распыливание появлением в жидкости явления кавитации с периодическим возникновением во время полуволны разрежения в пленке небольших полостей, которые заполнены парами жидкости. Распад этих полостей во время сжатия образует ударные волны, разрушение поверхности жидкости и приводит к распылению.

Однако непосредственно акустические волны (т. е. волны разрежения – сжатия) не могут вызывать образование капель. Так, если полагать, что длина волны сопоставима с диаметром частицы, т. е. если, то для создания капель со средним диаметром 20 мкм необходимы частоты порядка $\frac{c}{\lambda} \approx \frac{10^3}{2 \cdot 10^{-5}} = 50 \text{ МГц}$, вместе с тем известно, что ультразвуковые распылители дают капли размером несколько микрон.

Пульсации скорости значительно меняют характер разрушения пленки жидкости, что вызывает уменьшение размеров капель.

При воздействии на струю пульсирующим газовым потоком с интенсивностью, при которой струя не разрушается на поверхности, образуется пограничный слой, который будет обтекать основную струю с большей скоростью. При этом пульсации в струе будут происходить с большей частотой за счет образования вторичных волн, следовательно, получаемые капли должны обладать размерами порядка 2,5 мкм.

Акустическое распыливание с подводом колебаний через жидкость (ультразвуковое распыливание) [16, 17]. Жидкость подается на колеблющийся ультразвуковой частотой элемент пьезоэлектрического или магнитострикционного генератора и срывается с него в виде мелких капель. Недостатками пьезоэлектрических и магнитострикционных генераторов являются малая производительность (от 0,5 до 6 кг/ч) и необходимость сложного дорогостоящего оборудования.

Электростатическое распыливание [18]. В данном методе жидкости до ее истечения или в момент истечения сообщают электростатический заряд. Под действием кулоновских сил струя жидкости распадается на капли. Также возможен вариант, когда жидкость подается в область сильного электростатического поля, под действием которого на поверхности жидкости происходит некоторое распределение давления. Это вызывает деформацию струи и распад ее на капли. Недостатками электростатического распыливания являются необходимость в дорогостоящем оборудовании, его высокая энергоемкость, малая производительность и сложность обслуживания.

Пульсационное распыливание. Отличительная особенность данного метода – наложение пульсаций давления или расхода на поток распыливаемой жидкости. Возникающие при этом дополнительные колебания струи способствуют увеличению поверхностной энергии, быстрой потере устойчивости потока и, как следствие, более тонкому диспергированию. Пульсационное распыливание может сочетаться с любым из рассмотренных выше способов. При этом к преимуществам того или иного способа добавляется еще одно: повышение качества и однородности дробления, происходящее в ряде случаев без увеличения энергозатрат и при незначительном усложнении конструкции распылителей [3, 4].

Распыливание с предварительным газонасыщением. По этому способу жидкость перед подачей в распылитель или непосредственно в самом распылителе насыщают газом. Распределенные в жидкости пузырьки газа обуславливают значительное повышение поверхностной энергии, т. е. «разрыв» жидкости еще до ее истечения во многих случаях приводит к снижению ее

эффективной вязкости. К тому же, пузырьки газа сжимаются до давления жидкости в магистрали, при этом газ частично растворяется. При диспергировании жидкости давление в пузырьках газа быстро сбрасывается, срывает до давления внешней среды, при этом происходит резкое расширение пузырьков. Растворенный в жидкости газ начинает десорбироваться (падение давления, и равновесие сдвигается в область десорбции), при некоторых условиях происходит вскипание жидкости. Все это приводит к эффективному дроблению распыляемой жидкости [8].

Электрогидравлическое распыливание [19, 20]. По этому способу потоку жидкости сообщается дополнительная энергия за счет высоковольтного электрического разряда в полости распылителя. В образующемся плазменном шнуре наблюдается скачок температуры до нескольких тысяч градусов и скачок давления до нескольких тысяч атмосфер. Происходит выброс высокоскоростного потока капель, которые догоняют и дополнительно дробят частицы, покинувшие распылитель в период между импульсами. Кроме того, сопровождающие разряд ударная волна и кавитация длятся практически весь промежуток времени между импульсами и также приводят к дроблению жидкости, покидающей распылитель за это время.

Комбинированные методы распыливания. Сочетание нескольких перечисленных выше способов распыливания позволяет получить такие характеристики распыла, которые невозможно обеспечить применением каждого из них в отдельности.

1.3. Гидравлическое распыливание

В результате изучения существующих методов распыливания к дальнейшему рассмотрению принят метод гидравлического распыливания. Основным преимуществом данного метода является простота осуществления при наименьшем использовании энергетических ресурсов.

1.3.1. Классификация гидравлических форсунок

Согласно классификации гидравлических форсунок приведенной в [3, 4] различают струйные, с соударением струй, ударно-струйные, центробежные, центробежно-струйные, и комбинированные форсунки.

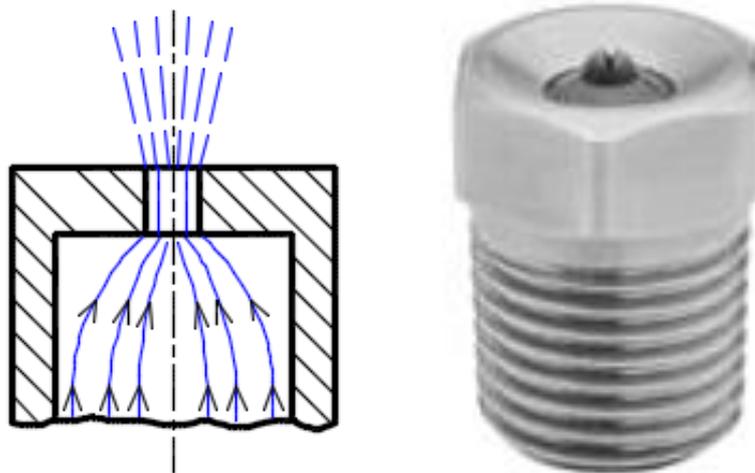


Рисунок 1.2 – Струйная форсунка

Струйные форсунки (рис. 1.2) представляют собой насадок с цилиндрическим или какой-либо другой формы отверстием. Вытекающая из него под действием перепада давления струя распадается на капли, образуя грубый полидисперсный факел с малым корневым углом.

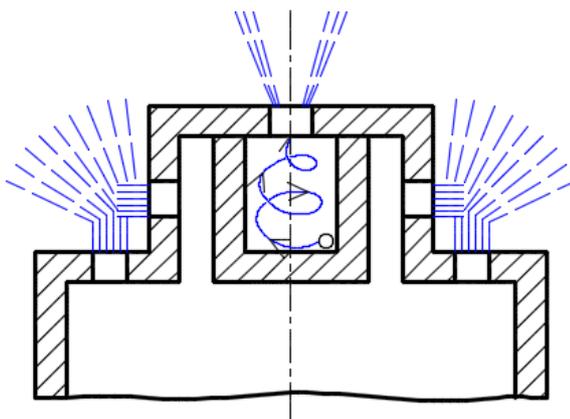


Рисунок 1.3 – Форсунка с соударением

Работа с *форсунок соударением* (рис. 1.3) основана на взаимном разбивании на капли нескольких струй, вытекающих из соответствующих насадков. Из точки столкновения двух цилиндрических струй результирующий поток растекается радиально, образуя плоскую пленку, распадающуюся на капли. При столкновении трех и более цилиндрических струй предотвращается выброс части жидкости в

верхнюю полуплоскость, а столкновение плоских струй позволяет получить факел, имеющий в сечении форму, близкую к прямоугольной.

В *ударно-струйных форсунках* (рис. 1.4) распыливание происходит за счет удара струи о расположенный напротив сопла отражательный элемент. В зависимости от конструкции отражателя образуется факел в виде одиночного полого конуса или в виде нескольких вставленных друг в друга конусов.

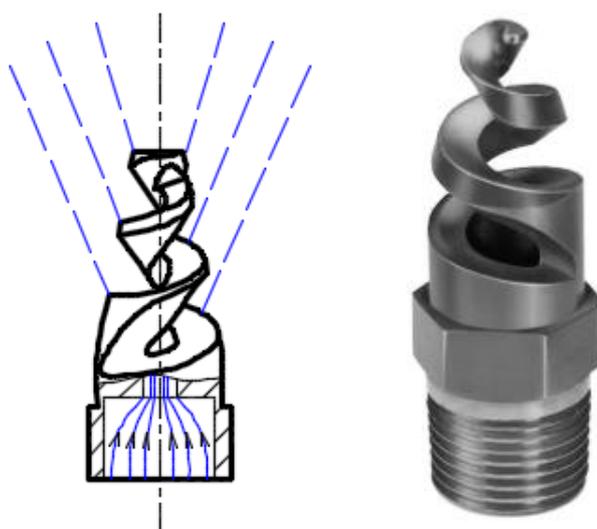


Рисунок 1.4 – Ударно-струйная форсунка

Центробежные форсунки (рис. 1.5) имеют либо тангенциальные входные отверстия, либо шнек, что придает подаваемой жидкости вращательное движение. В сопловом канале жидкость движется вдоль его стенки в виде тонкой пленки, а центр заполняет так называемый воздушный вихрь. При истечении из сопла пленка распадается, образуя факел в виде полого конуса.

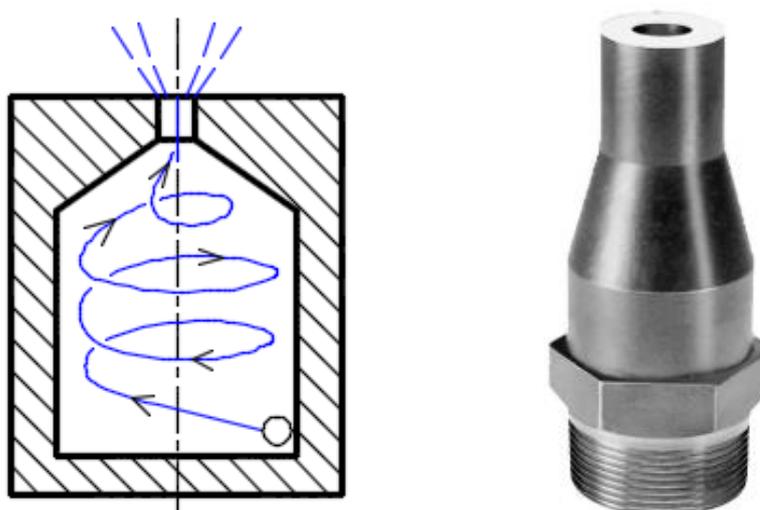


Рисунок 1.5 – Центробежная форсунка

Центробежно-струйные форсунки (рис. 1.6) отличаются от центробежных наличием двух потоков, на которые разделяется подводимая жидкость, взаимодействующих в камере смешения. Первому, периферийному, сообщается вращение, а второй подается в камеру смешения в виде осевой струи. Вращающийся поток передает часть энергии центральной струе и частично раскручивает ее, а сам несколько тормозится. В результате образуется единый результирующий поток, который за пределами соплового канала разрушается с образованием факела в виде заполненного конуса.

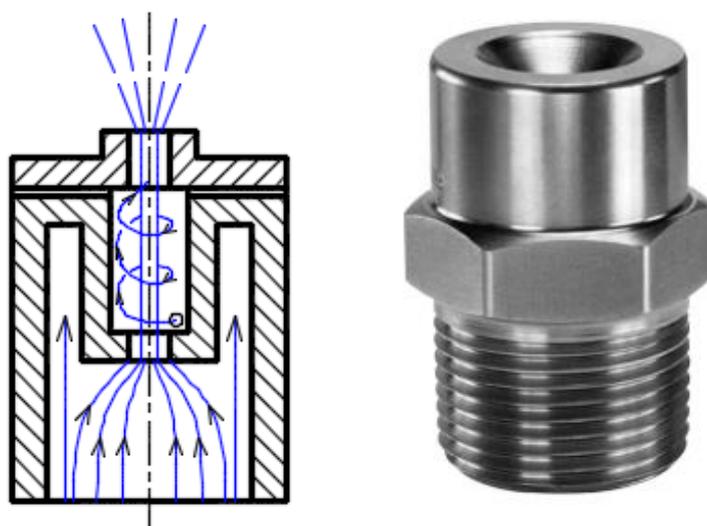


Рисунок 1.6 – Центробежно-струйная форсунка

Комбинированные форсунки состояются из двух или более распылителей рассмотренных классов, объединенных общим корпусом. Выбираемое сочетание диктуется требованиями, предъявляемыми к распылу, и условиям работы.

1.3.2. Распад пленок и струй при гидравлическом распыливании

При истечении жидкости из отверстий форсунок на поверхности струи или пленки возникают волны, распространяющиеся вдоль струи. Это волны капиллярного происхождения, они возникают в результате колебательного процесса, который существенно сказывается на распаде струи, пленки и капли на множество мелких капель. Распад вызывается волнами, которые имеют наиболее быстро нарастающую по времени амплитуду.

Механизм дробления жидкости, покинувшей распылитель, зависит главным образом от формы вытекающей струи и соотношения скоростей струи и

окружающего газа, которые в свою очередь определяются способом распыливания, классом и конструкцией распыливающего устройства.

При гидравлическом распыливании скорость окружающего газа в подавляющем большинстве случаев значительно меньше скорости истечения, а жидкость вытекает из распылителя в виде цилиндрической струи (рис. 1.6), плоской (рис. 1.7), круговой (рис. 1.8) или конической пленки.

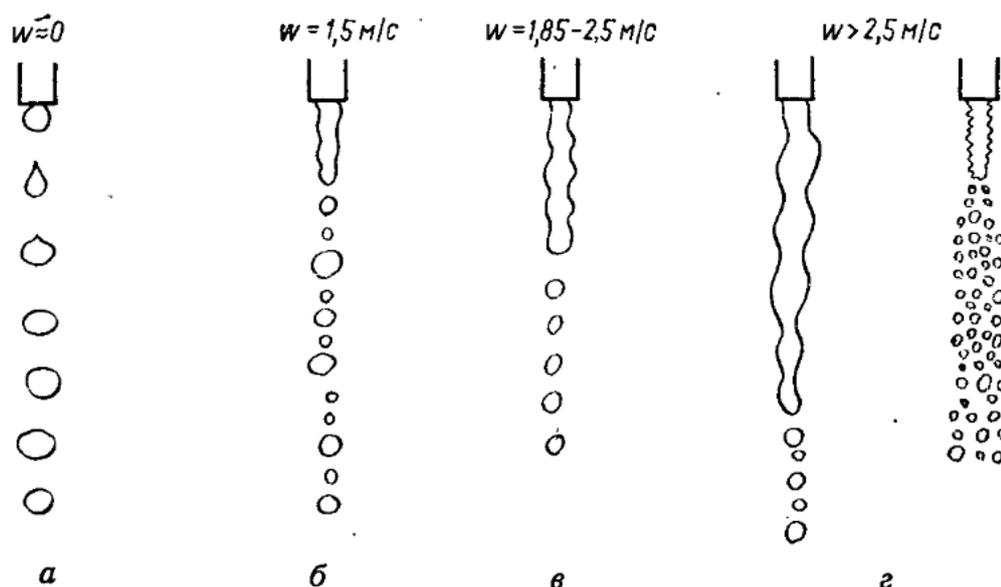


Рисунок 1.7 – Разрушение цилиндрической струи при постепенном увеличении скорости.

При постепенном увеличении скорости истечения наблюдаются следующие явления. Сначала жидкость покидает сопло в виде единичных капель (рис. 1.7 а). Увеличение скорости до 1,5 м/с приводит к образованию короткой струи и неравномерных капель (рис. 1.7 б). После отрыва капель создаются неравномерные расширения по длине струи. Под действием давления в расширении меньшего диаметра жидкость перетекает в расширение большего диаметра. Слияние или неслияние соседних расширений приводит к неравномерности и к увеличению крупной фракции получаемых капель.

При скорости истечения воды 1,85 – 2,5 м/с образуются наиболее равномерные капли (рис. 1.7 в): 99% имеют размер в пределах 0,75 – 0,43 мм.

При скорости истечения более 2,5 м/с длина струи увеличивается вплоть до максимума (рис. 1.7 г). Число капель одинакового размера при этом уменьшается, так как с увеличением скорости истечения наметившиеся сужения-перемычки

распадаются, образуя дополнительную маленькую капельку – «спутник». Число таких «спутников» увеличивается с ростом скорости истечения; при этом возрастает и число крупных капель. На этих повышенных скоростях режим истечения приближается к турбулентному.

При неизменной скорости истечения и при уменьшении поверхностного натяжения длина струи увеличивается. Это обусловлено меньшей скоростью сужения струи небольшими капиллярными силами, возникающими вследствие искривления поверхности жидкости. Одновременно наблюдается незначительное уменьшение диаметра, но однородность факела ухудшается, в нем возрастает число мелких капель.

Распад плоской пленки обусловлен двумя основными причинами: во-первых, возникновением на пленке отдельных перфораций, которые постепенно увеличиваются до образования сетки, состоящей из тонких нитей, распадающихся на мелкие капли (рис. 1.8 а, б); во-вторых, образованием на пленке перпендикулярно направлению потока неустойчивых волн (амплитуда которых возрастает при удалении от кромки сопла), приводящих к распаду пленки на параллельные нити, которые дробятся на капли (рис. 1.8 в).

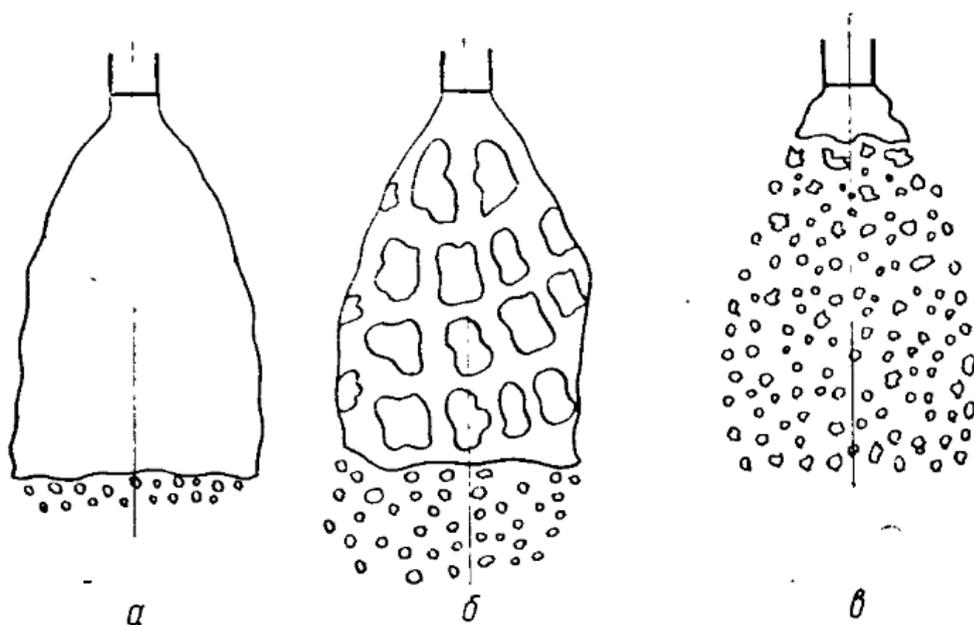


Рисунок 1.8 – Разрушение плоской пленки при увеличении скорости истечения.

При истечении жидкости из кольцевой горизонтальной щели или при растекании по отбойному элементу ударно-струйной форсунки образуется круговая пленка. При малой скорости истечения основным фактором, приводящим к разрушению пленки, является сила тяжести. Под ее воздействием уже на небольшом расстоянии от щели края пленки загибаются вниз (рис. 1.9 а), и она приобретает форму грибка, от кромки которого отрываются капли различных размеров.

При увеличении скорости истечения размеры пленки быстро увеличиваются, но долго сохраняются гладкая поверхность и целостность пленки, разрушение наблюдается лишь на ее краях, где от неровных зубцов отрываются капли (рис. 1.9 б). При дальнейшем росте скорости истечения на пленке появляются перфорации, а поверхность заметно турбулизуется (рис. 1.9 в). Дальнейшее увеличение скорости приводит к тому, что не распавшаяся пленка практически исчезает, в непосредственной близости от щели жидкость приобретает струйчатую (нитевидную) структуру, которая быстро преобразуется в поток капель (рис. 1.9 г).

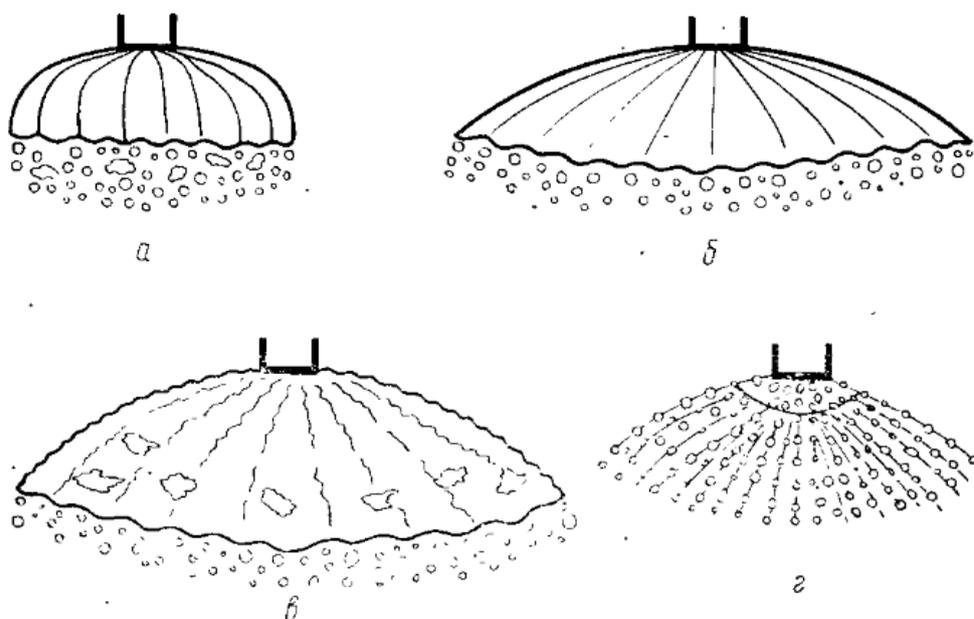


Рисунок 1.9 – Разрушение круговой пленки при увеличении скорости истечения

1.4. Цели и задачи исследования

Целью данной работы является исследование влияния избыточного давления на гидродинамические характеристики факела. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих способов распыливания, который позволит подобрать наиболее эффективный способ с меньшим размером капель и меньшими энергетическими затратами. По результатам анализа провести теоретическое исследование распыливания жидкости наиболее подходящим способом. Определить факторы, которые оказывают существенное влияние на корневой угол факела.

2. Спроектировать экспериментальную установку и разработать методику проведения эксперимента по определению корневого угла факела форсунки в зависимости от избыточного давления воздуха и температуры жидкости.

3. Провести эксперимент и обработать данные (получить аппроксимирующую зависимость, описывающую зависимость корневого угла распыла жидкости от избыточного давления)

4. Выполнить компьютерное моделирование процесса распыливания жидкости и получить расчетную 3D модель, описывающую влияние избыточного давления воздуха на корневой угол факела.

Глава 2. ТЕОРИЯ РАСПЫЛИВАНИЯ ЖИДКОСТИ УДАРНО-СТРУЙНЫМИ И ЦЕНТРОБЕЖНО-СТРУЙНЫМИ ФОРСУНКАМИ

2.1. Характеристики газожидкостного факела

Для оценки параметров факела распыла жидкости приняты дисперсные, расходные, энергетические, гидродинамические, характеристики формы и распределения [3].

Дисперсные характеристики определяют факел распыла жидкости, как совокупность частиц различных размеров. Они включают кривые распределения числа капель по диаметрам (рис. 2.1), средний диаметр капель, удельную поверхность капель и степень однородности распыла. Интегральные кривые (рис. 2.1 б) показывают относительное число капель, диаметр которых меньше (кривая G_p) или больше (кривая R_3) заданного.

Абсцисса максимума на частотной кривой представляет собой диаметр наиболее часто встречающихся капель. Этот диаметр называют модой. Диаметр, который делит площадь под суммарной кривой пополам ($G_p=R_3=0,5$), принято называть медианным.

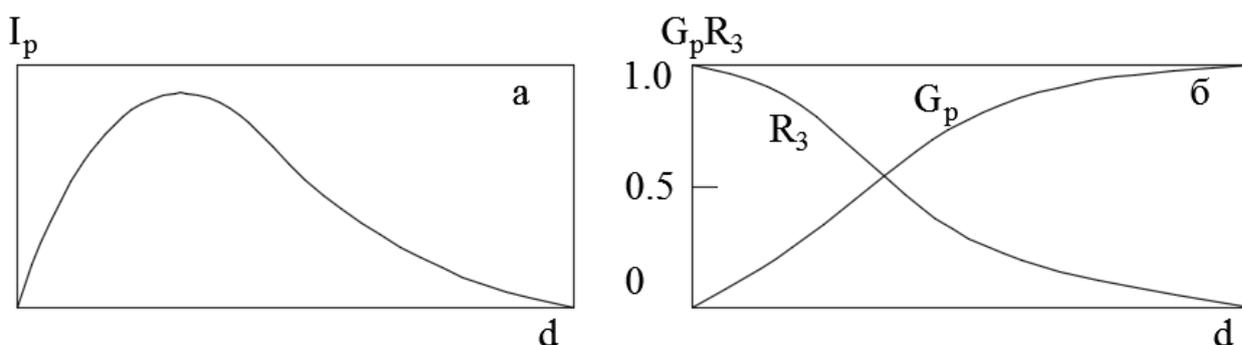


Рисунок 2.1 – Кривые распределения капель по диаметрам: а – частотная, б– суммарные

Другие средние диаметры, характеризующие распыл, можно представить общей формулой:

$$d_{f,k} = \left(\frac{\sum d_i^f \cdot n_i}{\sum d_i^k \cdot n_i} \right)^{\frac{1}{f-k}}, \quad (2.1)$$

где f, k – целые числа, зависящие от способа осреднений;

i – номер фракции, на которые разбита совокупность капель;

d_i – средний диаметр i -той фракции;

n_i – число капель i -той фракции.

В таб. 2.1 приводятся принятые названия, обозначения и области применения получаемых по формуле (2.1) средних диаметров капель и соответствующие значения f и k .

Таблица 2.1 – Средние диаметры капель

Значения		Название среднего диаметра	Обозначение среднего диаметра	Область применения
f	k			
1	0	Арифметический	d_{10}	Сравнение дисперсных систем
2	0	Поверхностный	d_{20}	Контроль поверхности
3		Объемный	d_{30}	Контроль объема
3	0	Объемно-поверхностный	d_{32}	Тепло- и массообмен
4	0	Массовый	d_{43}	Процессы горения

Характеристики распределения отражают профиль удельных потоков жидкости по сечению факела. К ним относятся коэффициенты радиальной $k_{н. р.}$ и окружной $k_{н. о.}$ неравномерности. Коэффициент радиальной неравномерности показывает насколько распределение плотности орошения (отношение секундного расхода жидкости к площади, перпендикулярной движению капель) отличается от идеально равномерного. Коэффициент окружной неравномерности позволяет оценить, насколько факел распыла симметричен относительно оси. Коэффициент неравномерности в значительной мере определяется характером распределения плотности орошения по сечению факела. Выделяют 3 типа распределения плотности. Струйное распределение – распределение, в котором плотность орошения q максимальна на оси и монотонно убывает к периферии факела, характерно для факелов, образующихся при разрушении сплошных струй. Центробежное распределение – распределение, при котором q имеет провал на оси, затем возрастает до максимума и после этого монотонно убывает.

Центробежно-струйное распределение – все промежуточные варианты распределений плотности орошения.

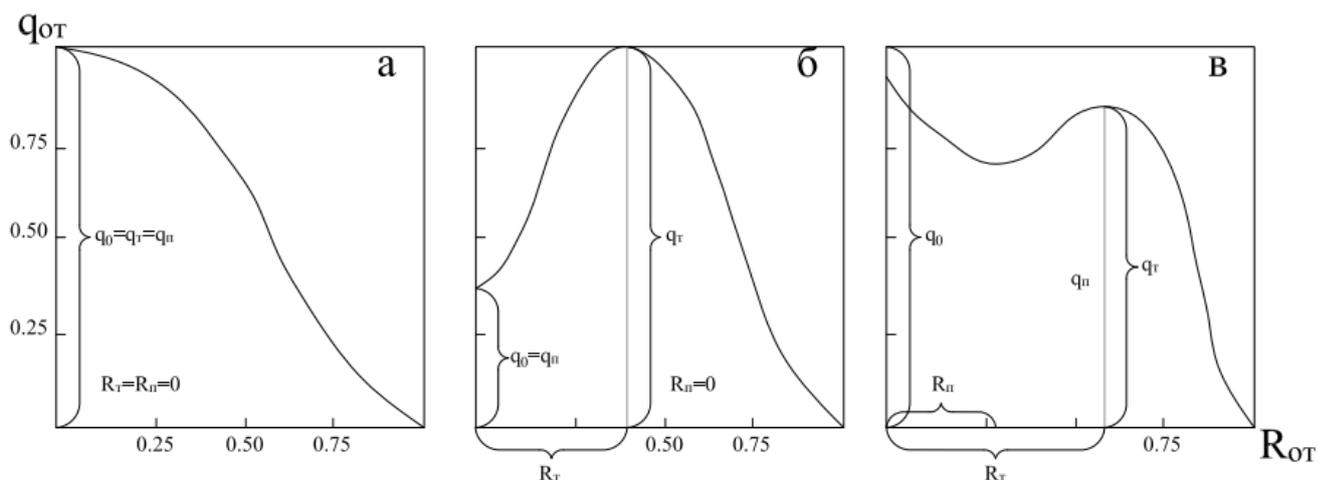


Рисунок 2.2 – Параметрическое описание распределения плотности орошения: а – струйного, б – центробежного, в – центробежно-струйного

Характеристики формы позволяют определить габариты факела на заданном расстоянии. К ним относятся корневой угол факела, диаметр факела и дальнобойность факела. Расширение факела жидкости определяется величиной корневого угла факела и распределением жидкости по радиусу факела [2]. Зависимость корневого угла от геометрических размеров сопла, скорости истечения и противодействия исследовалось экспериментально. Результаты опытов показывают, величина корневого угла факела при непрерывном истечении жидкости зависит от критериев Вебера, Лапласа и критерия M , характеризующих процесс распыливания. Зависимость тангенса половины корневого угла факела от указанных критериев имеет вид:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = CW_1^k Lp^l M^m, \quad (2.2)$$

где C, k, l, m – постоянные числа, полученные при обработке опытных данных.

Кроме указанных критериев, некоторое влияние на корневой угол факела оказывает форма соплового отверстия и начальное возмущение потока жидкости.

Распределение распыленной жидкости показано на рис. 2.3. На рис. 2.3 а приведено радиальное распределение удельных потоков жидкости на различных расстояниях от сопла форсунки. Максимальный удельный поток находится на оси факела, и при удалении от оси он уменьшается. По мере увеличения

расстояния от соплового отверстия, противодействия газа за соплом и роста скорости истечения из форсунки поля удельных потоков в поперечном сечении факела становится более равномерным (рис. 2.3 б, в). При увеличении диаметра соплового отверстия (при прочих неизменных условиях истечения) возрастают удельные потоки и расширяются границы факела (рис. 2.3 г)

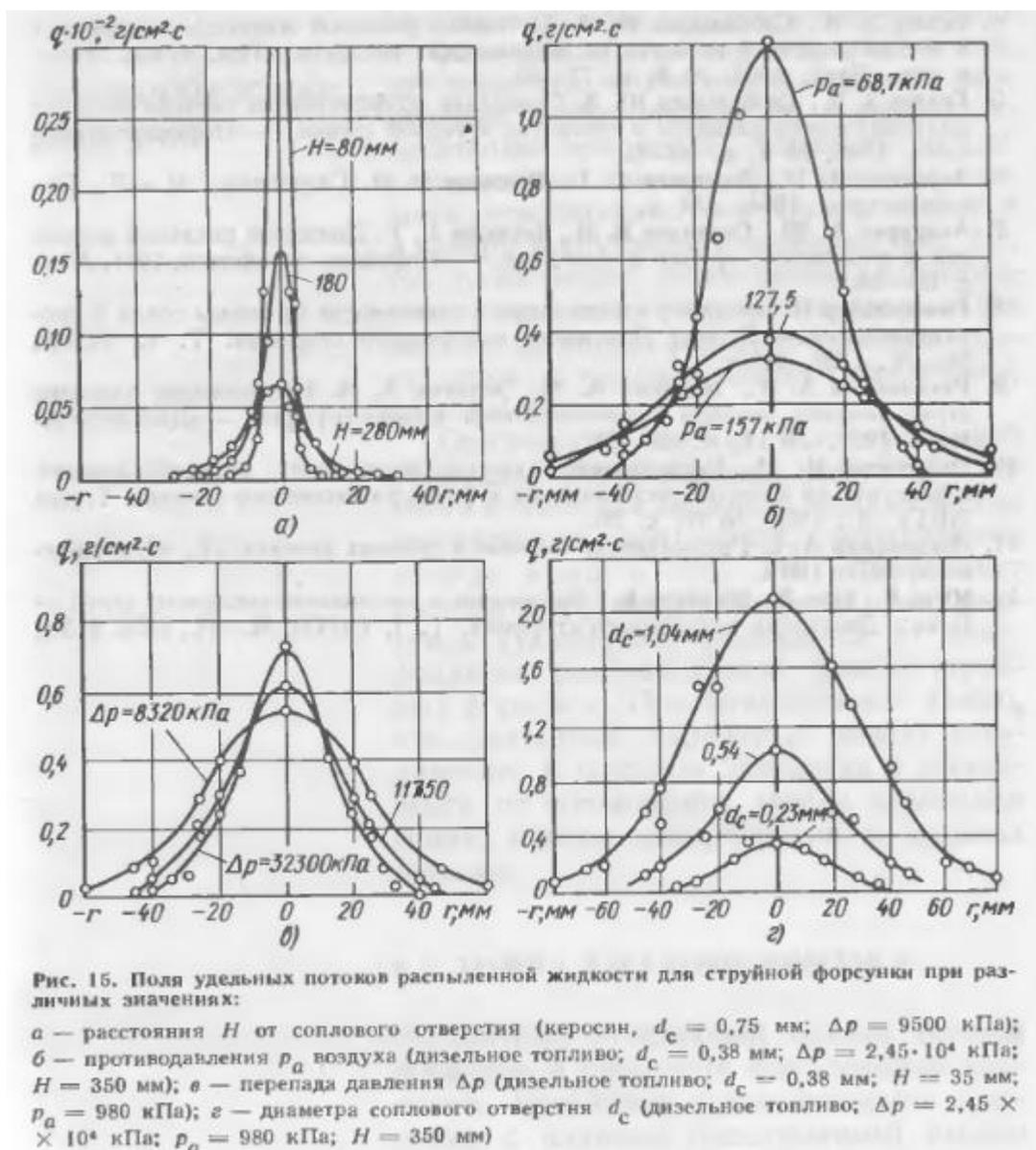


Рисунок 2.3 – Поля удельных потоков распыленной жидкости при различных значениях:
а – расстояния H от соплового отверстия, б – противодействия p_a воздуха, в – перепада давления Δp , г – диаметра соплового отверстия d_c

Расходные характеристики позволяют определить коэффициент расхода, т. е. во сколько раз реальный расход меньше теоретического. Отличие реального расхода от теоретического обусловлено тем, что реальная скорость на выходе из распылителя вследствие потерь энергии меньше теоретической. А также тем, что

струи на выходе занимает не все сечение соплового канала (вследствие ее сжатия или образования воздушного вихря).

Энергетические характеристики используются для оценки экономичности способа распыливания или распыливающего устройства. Подводима к распылителю энергия E делится на: энергию распыливания E_p (энергия на преодоление сил поверхностного натяжения при распаде струи жидкости на капли), гидравлическую энергию E_z (энергия на сообщение жидкости поступательного движения), энергию потерь E_n (энергия на преодоление сил трения в распылителе и диссипацию энергии в потоке).

Гидродинамические характеристики включают скорости капель и газа в любом сечении факела и прозрачность факела. Они необходимы для расчета тепло-массообменных процессов, протекающих в распылах и определяются начальной скоростью и размером капель, формой факела, а также свойствами газовой среды.

Ударно-струйные форсунки. Процесс распыливания, независимо от конструктивной схемы форсунки, состоит из следующих фаз: течение жидкости в струе, течения в пленке по поверхности отражателя, срыва пленки с этой поверхности и распада ее на капли.

При набегании круглой струи нормально к плоскости отражателя (рис. 2.4) жидкость от его центра течет к периферии. У поверхности отражателя образуется пограничный слой, толщина которого $\delta_{н.с.}$ увеличивается в направлении течения. Толщина же пленки $\delta_{н.л.}$ уменьшается, и на некотором расстоянии $R_{см}$ она становится равной толщине пограничного слоя. Радиус $R_{см}$ называют радиусом смыкания, а точку M – точкой смыкания. Все поле течения можно условно разделить на две области: область потенциального течения Π и область вязкого течения B .

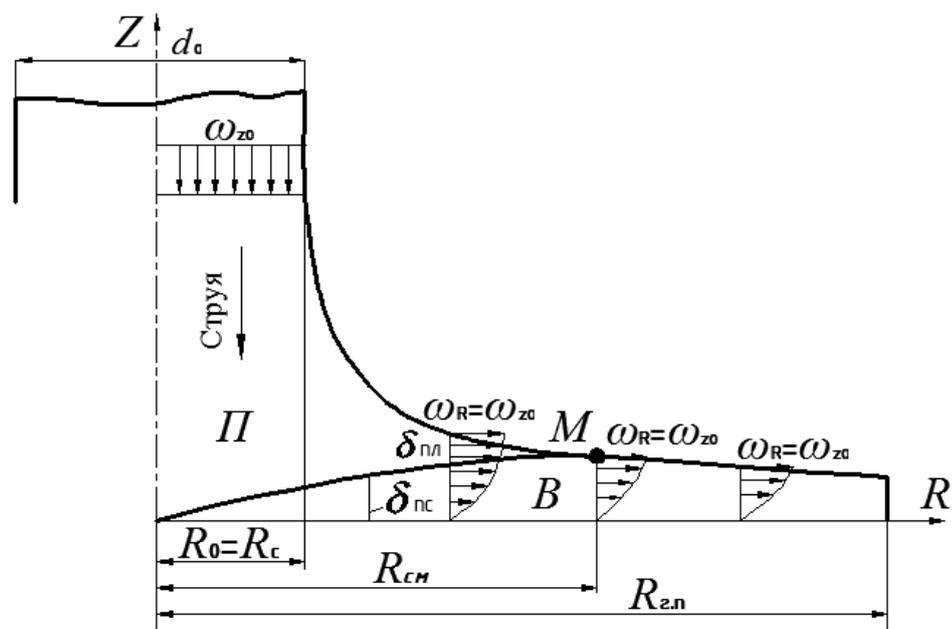


Рисунок 2.4 – Схема течения жидкости по поверхности отражателя ударно-струйной форсунки

Область потенциального течения включает: а) невозмущенный осевой поток с известным профилем скорости; б) зону перехода от осевого потока к радиальному (отклонение струи); в) зону свободного радиального течения. В области вязкого течения можно выделить: а) течение в окрестности критической точки, ограниченное окружностью радиусом R_0 , в которой скорость потока быстро возрастает от 0 до ω ; б) радиальное течение типа пограничного слоя до точки смыкания пограничного слоя с толщиной пленки (здесь градиент давления в направлении потока практически отсутствует, скорость вне пограничного слоя постоянна и равна ω); в) течение за точкой смыкания – область гидродинамической зависимости; г) область гидравлического прыжка.

Как показали исследования [36], характер взаимодействия струи с преградой во многом определяется профилем скоростей в области Π . При истечении жидкости из сопла со скоростью 15 – 30 м/с (что характерно для ударно-струйных форсунок) профиль скоростей в струе близок к прямолинейному. В зоне отклонения струи постепенно уменьшается осевая составляющая скорости и возрастает радиальная.

Для практических целей интересны толщина пленки и средняя скорость течения жидкости в ней на внешней кромке отражателя, которые определяют дисперсность распыливания и гидродинамику факела. В зависимости от размеров сопла, скорости истечения струи и размеров отражателя кромка последнего может оказаться в любой из указанных зон вязкого течения.

Опуская подробные математические выкладки, данные в работе [37], приведем уравнение для толщины пограничного слоя в окрестности критической точки 0, являющееся частным решением уравнения Навье-Стокса:

$$\delta_{н.с.} = 2,4 \cdot \sqrt{\frac{\mu_{жс}}{\rho_{жс} \cdot \alpha}} \quad (2.3)$$

где $\alpha = \frac{\omega_R}{R} = const$; $R < R_0$.

На верхнем крае пограничного слоя, т.е. при $R = R_0$, $\omega_R = \omega_{Z0}$, тогда:

$$\delta_{н.с.} = 2,4 \cdot \sqrt{\frac{\mu_{жс} \cdot R_0}{\rho_{жс} \cdot \omega_{Z0}}} \quad (2.4)$$

При $R_{см} > R > R_0$ толщина пограничного слоя определяется режимом течения в нем; при ламинарном режиме ($Re < 10^6$) выражение $\delta_{н.с.}$ аналогично (2.4), а при турбулентном режиме имеет вид:

$$\delta_{н.с.} = 0,246 \cdot R^{\frac{4}{5}} \cdot R_0 \left(\frac{\mu_{жс} \cdot R_0}{G_{жс} \cdot \rho_{жс}} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (2.5)$$

Радиус смыкания можно определить по уравнению

$$R_{см} = \left(\frac{9}{16\pi^2 k_1^0} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{G_{жс}^2 \cdot \rho_{жс}}{\mu_{жс} \cdot \omega_{Z0}} \right) \quad (2.6)$$

где k_1^0 - константа.

Как следует из рис. 2.4, средняя скорость течения пленки в рассматриваемой области убывает за счет увеличения толщины пограничного слоя и может быть определена из соотношения:

$$\omega_{R,ср} = \frac{G_{жс} \cdot \omega_{Z0}}{G_{жс} + 4,95R \cdot \sqrt{\frac{\omega_{Z0} \cdot R \cdot \mu_{жс}}{\rho_{жс}}}} \quad (2.7)$$

Учитывая, что при $z = \delta_{нл.}$ имеем $\omega_R = \omega_{Z0}$, можно определить среднюю скорость пленки на радиусе смыкания при ламинарном режиме течения (параболический профиль скорости по толщине пленки) и при турбулентном режиме (профиль скорости по толщине пленки описывается законом) [37]:

$$\omega_{R_{cp}} = 0,66\omega_{Z0} \quad (2.8)$$

$$\omega_{R_{cp}} = 0,88\omega_{Z0} \quad (2.9)$$

За радиусом смыкания, т.е. при $R_{cm} < R < R_{z.n.}$, уравнение для средней скорости в пленке определяется из условия равновесия ее кольцевого элемента и может быть записано в виде:

$$\omega_{R_{cp}} = \frac{k_1 \cdot G_{жс}^2 \cdot \omega_{Z0} \cdot \rho_{жс}}{4\pi^2 \cdot \mu_{жс} \cdot \omega_{Z0} \cdot k_1 \cdot (R^3 - R_{cm}^3) + G_{жс}^2} \quad (2.10)$$

Толщину пленки в этой области легко определить из условий постоянства расхода:

$$\delta_{нл.} = \frac{G_{жс}}{2 \cdot \pi \cdot R_{cm} \cdot \omega \cdot R_{cp}} \quad (2.11)$$

Размер образующихся капель для форсунок со сплошным отражателем можно определить по эмпирическому уравнению полученному в работе [38]:

$$\frac{d_{32}}{d_c} = 4,71 \cdot 10^{-2} \cdot Ga^{-0,59} \cdot Fr^{-0,5} \quad (2.12)$$

где $Ga = \frac{g \cdot d_c^3 \cdot \rho_{жс}^2}{\mu_{жс}^2}$ - критерий Галилея;

$Fr = \frac{\omega^2}{g \cdot d_c}$ - критерий Фруда.

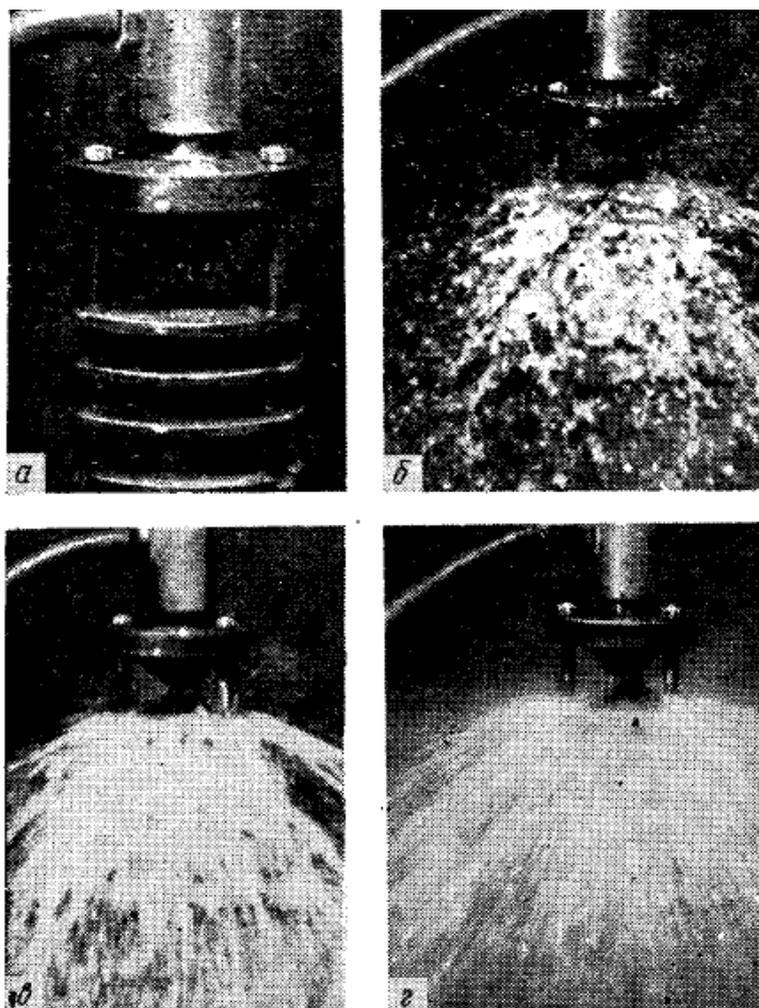


Рисунок 2.5 – Распыливание жидкости каскадной ударно-струйной форсункой:
а – общий вид форсунки; б – $P=10$ кПа; в – $P=40$ кПа; г – $P=80$ кПа.

В каскадных ударно-струйных форсунках по каждому отражательному элементу растекается только часть жидкости, которая «срезается» с поверхности струи на этом каскаде. На рис. 2.5 представлены фотографии, иллюстрирующие изменение характера распыливания жидкости каскадными форсунками при увеличении давления перед соплом. В опытах была использована четырехкаскадная форсунка с диаметром сопла 20 мм. Диаметры отверстий первых трех отражателей были выбраны так, чтобы расход жидкости на всех ступенях был одинаковым. При малом давлении (до 10 – 20 кПа) со всех отражателей срывается сплошная пленка, распадающаяся затем на крупные капли. При увеличении скорости жидкости пленка начинает распадаться в непосредственной близости от отражателя с образованием крупных частиц и капель различных размеров.

Затем пленочный характер течения преобразуется в струйчатый. С кромок отражателя срываются многочисленные струйки в виде нитей, толщина которых уменьшается с увеличением скорости течения. Образование капельного факела является следствием распада этих нитей. Из фотографий хорошо видно, что корневой угол образующегося факела определяется углом конусности отражательного элемента.

Для анализа течения жидкости по отражательным элементам и определения диаметра капель можно применить приведенные выше зависимости к каждому элементу, подставив соответствующий расход жидкости по нему. В случае равных расходов можно принять течение на всех элементах идентичным.

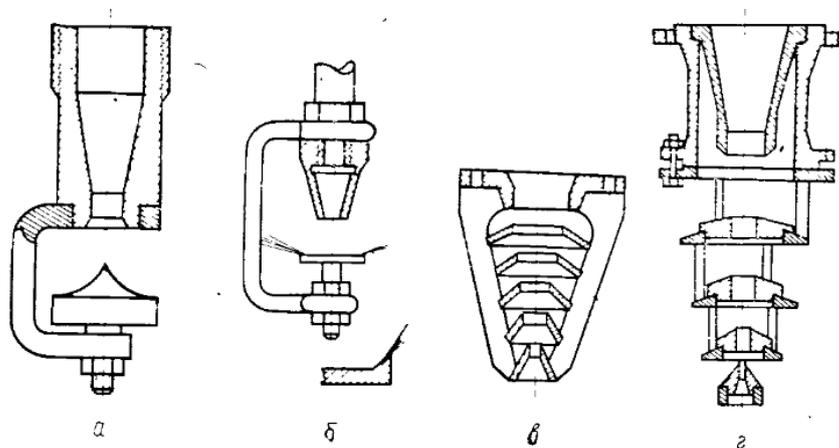


Рисунок 2.6 – Схемы ударно-струйных форсунок со сплошным отражателем (а, б) и каскадных (в, г)

На рис. 2.6 а, б приведены схемы форсунок со сплошным отражателем. Каскадные форсунки показаны на фотографии (рис. 2.5 а) и на рис. 2.6 в, г.

В центробежно-струйной форсунке (рис. 2.7) жидкость разделяется на два потока: один проходит через винтовые каналы вкладыша, а второй формируется в результате прохождения части жидкости через осевое отверстие. Закрученный и осевой потоки взаимодействуют в камере смешения и в сопловом канале (рис 2.8) это взаимодействие является определяющим в формировании факела распыла жидкости.

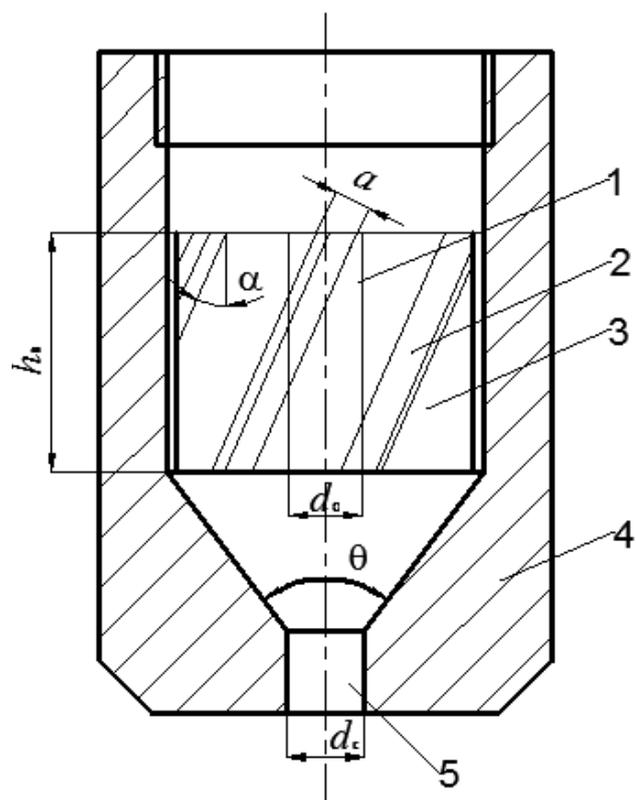


Рисунок 2.7 – Схема центробежно-струйной форсунки с цилиндрическим вкладышем:
 1 – осевой канал; 2 – винтовые каналы; 3 – вкладыш; 4 – корпус; 5 – сопло.

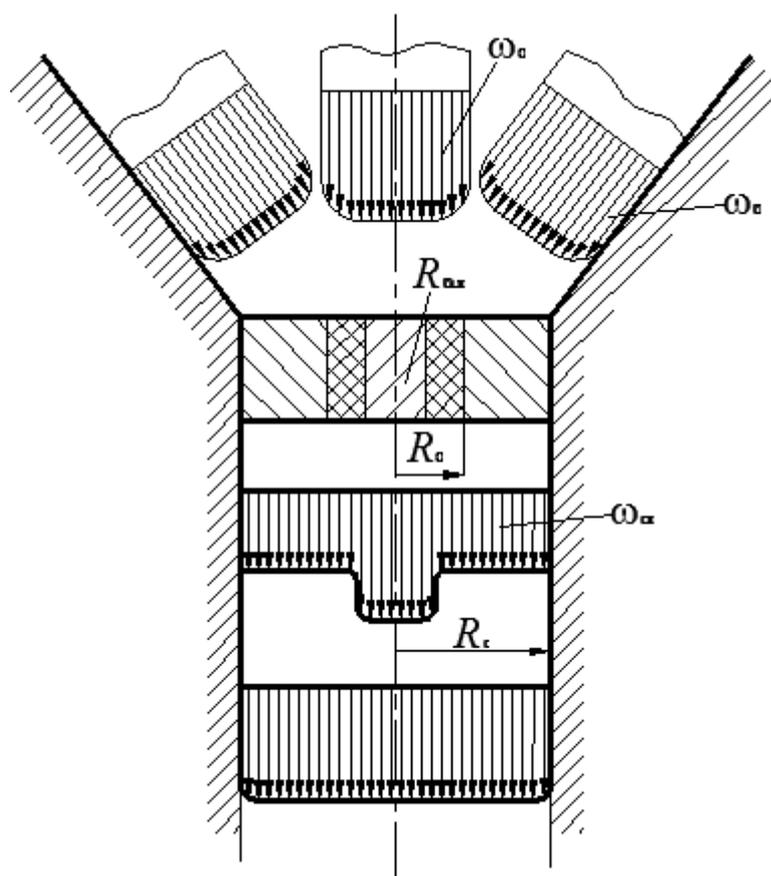


Рисунок 2.8 – Схема взаимодействие потоков жидкости в камере смешения и в сопловом канале форсунки

На рис. 2.9 приводятся фотографии факела распыленной жидкости, полученные при давлении 0,2 МПа на расстоянии 30, 70 и 100 мм от среза сопла диаметром 4 мм. Видно, что за срезом сопла расположен сплошной нераспавшийся участок струи, хотя поверхность ее заметно турбулизирована (рис. 2.9а). Ниже в струе образуются каверны, которые заполняются воздухом. Далее они разрастаются, а разделяющие их жидкостные перегородки становятся тоньше. На расстоянии 70 мм от среза сопла перегородки между кавернами разрушаются, отделяющаяся жидкость образует замкнутые, неправильной формы перемычки, затянутые тонкой пленкой, местами перфорированной (рис. 2.9 б). На этом участке факел отдаленно напоминает пену. При удалении от среза сопла на 100 мм пленки между перемычками разрушаются с образованием множества мелких капель. Нарушается и целостность перемычек, от них отделяются крупные частицы различной формы, которые в дальнейшем распадаются с образованием как крупных, так и мелких капель (рис. 2.9 в).

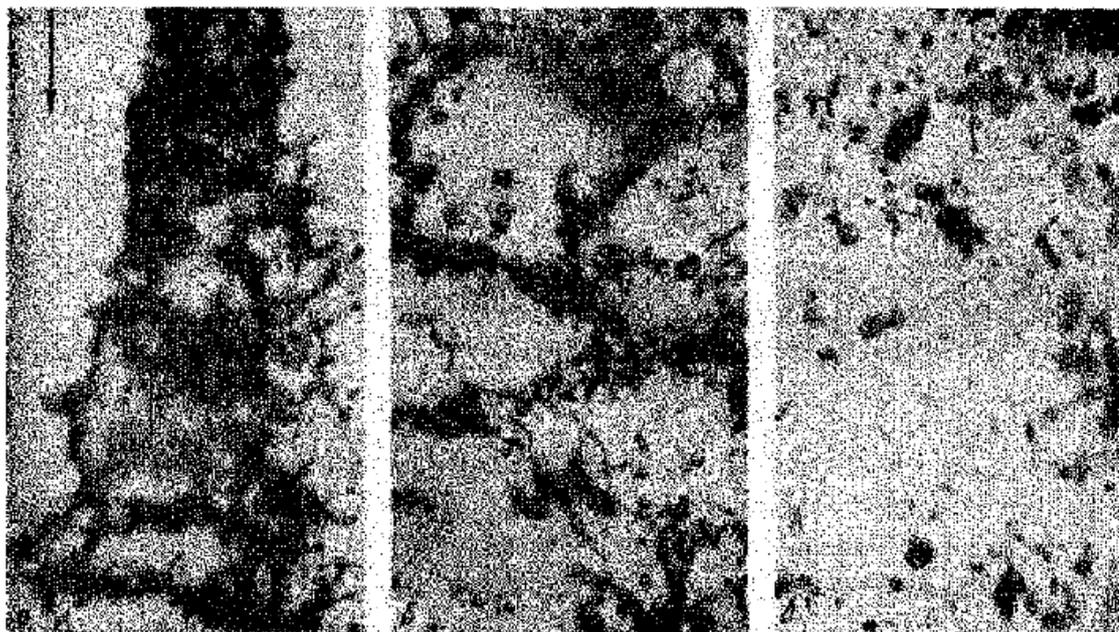


Рисунок 2.9 – Распад струи жидкости, вытекающей из форсунки, на различных расстояниях от среза сопла: а – 30 мм; б – 70 мм; в – 100мм.

Весь корневой участок факела можно условно разделить на три зоны: струйного течения, пенно-пленочного состояния и образования капель. Очевидно, образование широкого спектра капель связано с разрушением крупных частиц

жидкости на последнем этапе распада. Следовательно, полидисперсность и средний размер капель можно уменьшить, если максимально продлить существование пенно-пленочного состояния; тогда перемычки будут тоньше и будут распадаться с образованием капель меньших размеров.

2.2. Распределение распыленной жидкости в факеле[2]

При малых значениях скорости истечения форма факела близка к конической. С увеличением скорости истечения уже на сравнительно небольших расстояниях от сопла факел начинает сжиматься и его форма приближается к цилиндрической.

Причина сжатия факела состоит в следующем: во время движения капли эжектируют газ так, что внутри факела образуется разрежение; под действием перепада давления внутрь факела устремляется газ из окружающего пространства, вследствие чего и происходит отклонение капель от их первоначального направления к оси и его сжатие. Однако, если корневой угол превышает $100 - 110^\circ$, то сжатие факела отсутствует, так как улучшаются условия эжектирования газа во внутренней области факела.

Развитие факела, следовательно, существенным образом зависит от условий эжектирования окружающего факел газа. Изменяя условия, можно искусственно видоизменять форму факела. Так, например, если поместить факел внутри твердой конической оболочки, имеющей угол при вершине, лишь немного превышающий корневой угол факела, и препятствующей доступу газа из окружающего пространства, то факел не только не будет сжиматься, но, наоборот, будет прижиматься к внутренней поверхности оболочки.

Таким образом, распределение жидкости по радиусу факела при впрыскивании в неподвижную среду с давлением, равным атмосферному, зависит от трех параметров: перепада давления на форсунке, корневого угла факела и расстояния между рассматриваемым сечением факела и соплом форсунки.

В ряде случаев интерес представляет не столько поле удельных потоков, сколько окружная равномерность распределения жидкости в факеле

распыливания, характеризующая конструкцию и качество изготовления распылителя форсунки. Если форсунку применяют для распыливания топлива в камерах сгорания, то к окружной равномерности распределения жидкости обычно предъявляют достаточно жесткие требования.

Для измерения окружной равномерности распределения жидкости в факеле применяют так называемый секторный сборник, представляющий собой сосуд, разделенный на ряд секторов, устанавливаемый на некотором расстоянии от среза сопла форсунки соосно с ним. По результатам измерения количества жидкости, поступившей в каждый из секторов сборника, можно построить диаграмму распределения жидкости по окружности факела (рис. 2.10).

В качестве количественной характеристики окружной равномерности распределения жидкости в факеле распыливания обычно применяют коэффициент неравномерности

$$K = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{cp}} \cdot 100 \quad (2.13)$$

где Q_{\max} , Q_{\min} , Q_{cp} – соответственно максимальный, минимальный и средний объемы жидкости в секторе.

Коэффициент неравномерности распределения зависит не только от параметров форсунки, но и от давления подачи, числа секторов в сборнике и взаимного расположения форсунки и сборника.

Основными причинами неравномерного распределения жидкости вокруг оси факела являются различные асимметрии распылителя, связанные с его конструкцией (конечное число входных каналов), или качеством его изготовления (эксцентриситет сопла по отношению камеры закручивания, различие в размерах входных каналов, наличие рисок и заусенцев). Как бы совершенна ни была конструкция форсунки, если она изготовлена плохо, то равномерность окружного распределения жидкости будет неудовлетворительной, так же как самым тщательным образом выполненная форсунка не обеспечит хорошей равномерности, если она сконструирована неправильно.

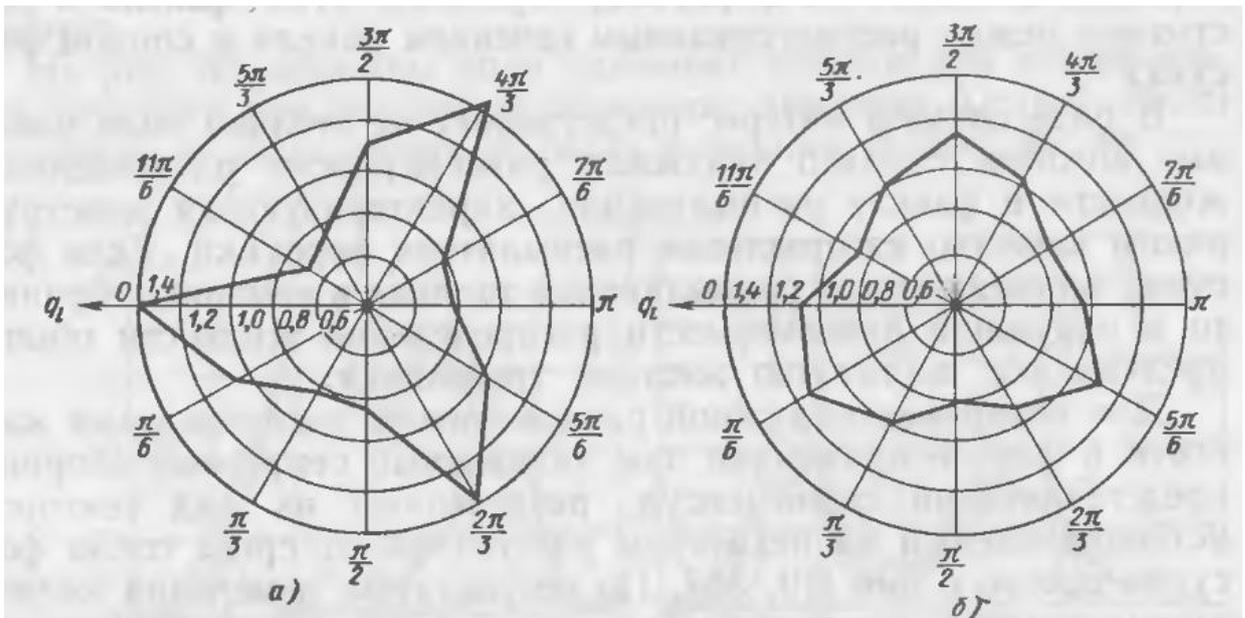


Рисунок 2.10 – Диаграмма распределения жидкости для 12-секторного сборника.
 а) $C_c=0,83$; $K=70\%$; б) $C_c=1,06$; $K=32\%$ (q_l – отношение количества жидкости поступившей в данный сектор к среднему количеству жидкости в секторе)

При конечном числе входных каналов жидкая пленка в сопле форсунки всегда, в принципе, имеет неодинаковую толщину, и, следовательно, распределение жидкости в факеле распыливания будет неравномерным. Особенно четко указанная закономерность проявляется для форсунок с большой степенью раскрытия сопла, что видно на рис 2.10, на котором представлены результаты испытаний форсунки с тремя выходными каналами и различным значением характеристики $C_c = \frac{R}{r_c}$. Чем более раскрытой является форсунка, т.е. чем меньше величина C_c , тем ярче выражена окружная неравномерность распределения жидкости при одинаковом числе входных каналов и тем больше значение коэффициента неравномерности.

Неравномерность толщины пленки в сопле форсунки и, следовательно, неравномерность распределения жидкости в факеле распыливания существенным образом зависит от геометрической характеристики форсунки. Чем больше геометрическая характеристика, тем меньше коэффициент заполнения сопла φ_c и тоньше пленка жидкости $\Delta = r_c - r_m = r_c \cdot (1 - \sqrt{1 - \varphi_c})$ и тем сильнее влияет конечное число входных каналов на равномерность распределения жидкости в факеле. С

увеличением числа входных каналов равномерность окружного распределения жидкости (при $C_c = const$, $\varphi_c = const$) улучшается.

Некоторое влияние на равномерность распределения оказывает также длина камеры закручивания: чем длиннее камера, тем большее расстояние проходят струи жидкости до входа в сопло и тем меньше неравномерность распределения.

Таким образом, коэффициент неравномерности зависит от степени раскрытия сопла C_c , числа входных каналов n , коэффициента заполнения сопла φ_c и относительной длины камеры закручивания L_k/D_k .

Экспериментальные зависимости $K = f(C_c)$ для форсунок с различным числом входных каналов и короткой камерой закручивания $L_k/D_k \leq 0,3$ при $\varphi_c = 0,2$ представлены на рис 2.11, причем каждая кривая проведена не менее чем по 25 экспериментальным точкам. Как видно из графика, для каждого значения n существует такое значение $C_c = C_c^*$, что при $C_c > C_c^*$ коэффициент неравномерности уже не зависит от C_c и $K = 10\%$. Это среднестатистический уровень неравномерности для форсунки без грубых технических дефектов определяется, по-видимому, неизбежными случайными отклонениями в размерах распылителя. С увеличением числа входных каналов при данном φ_c величина C_c^* уменьшается.

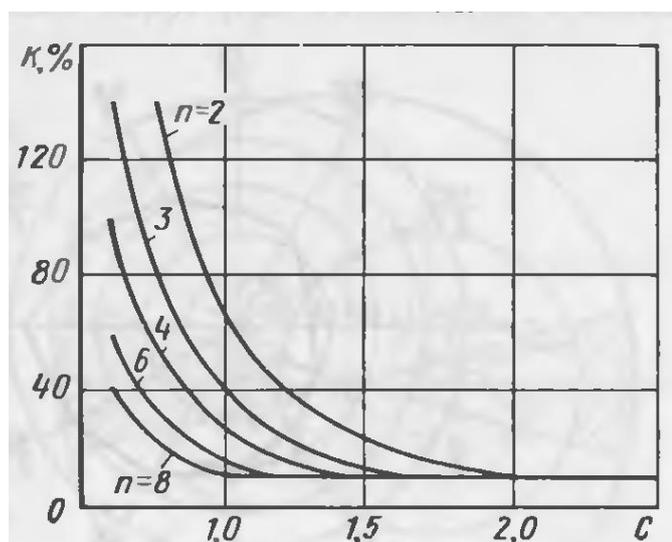


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента неравномерности K от C_c для форсунок с различным числом входных каналов

Зависимость коэффициента окружной неравномерности от определяющих факторов для форсунки, выполненной без технологических дефектов, включая

форсунки с длинной камерой закручивания можно представить следующей эмпирической формулой:

$$K = \frac{23,7}{c^{2,7} \cdot n^{1,34} \cdot \varphi_c^{1,1} \cdot \left(\frac{L_K}{D_K}\right)^{0,15}} \quad (2.14)$$

Коэффициент неравномерности существенно зависит от степени раскрытия сопла C_c , слабее от числа входных каналов и коэффициента заполнения сопла и незначительно – от длины камеры закручивания.

Как уже указывалось, равномерность распределения жидкости в факеле распыливания центробежной форсунки зависит от качества изготовления ее распылителя. Особенно влияние дефектов изготовления проявляется в так называемых закрытых форсунках. Именно дефекты определяют повышенное значение коэффициента неравномерности.

Наиболее часто встречаются дефекты в виде висок и забоин в сопле форсунки и заусенцев во входных каналах. Они вызывают заметную неравномерность распределения жидкости в факеле с ярко выраженными максимумами и минимумами, произвольно расположенными по окружности диаграммы распределения. Дополнительная обработка сопла, в особенности его выходной кромки, позволяет устранить имеющиеся дефекты, что существенно улучшает равномерность распределения жидкости в факеле распыливания.

Неравномерность распределения жидкости в факеле появляется также при эксцентриситете между соплом и камерой закручивания или различных величине плеча закручивания и площади сечения отдельных входных каналов. С нарушением симметрии течения жидкости в форсунке происходит одностороннее утолщение пленки в сопле, связанное со смещением оси газового вихря относительно оси сопла.

О наличии эксцентриситета между камерой закручивания и соплом форсунки можно судить по диаграмме распределения: вся диаграмма смещается относительно оси форсунки и при этом тем сильнее, чем больше величина эксцентриситета. В качестве примера на рис. 2.12 приведены типичные

диаграммы распределения для форсунок с различным эксцентриситетом и одинаковой геометрической характеристикой.

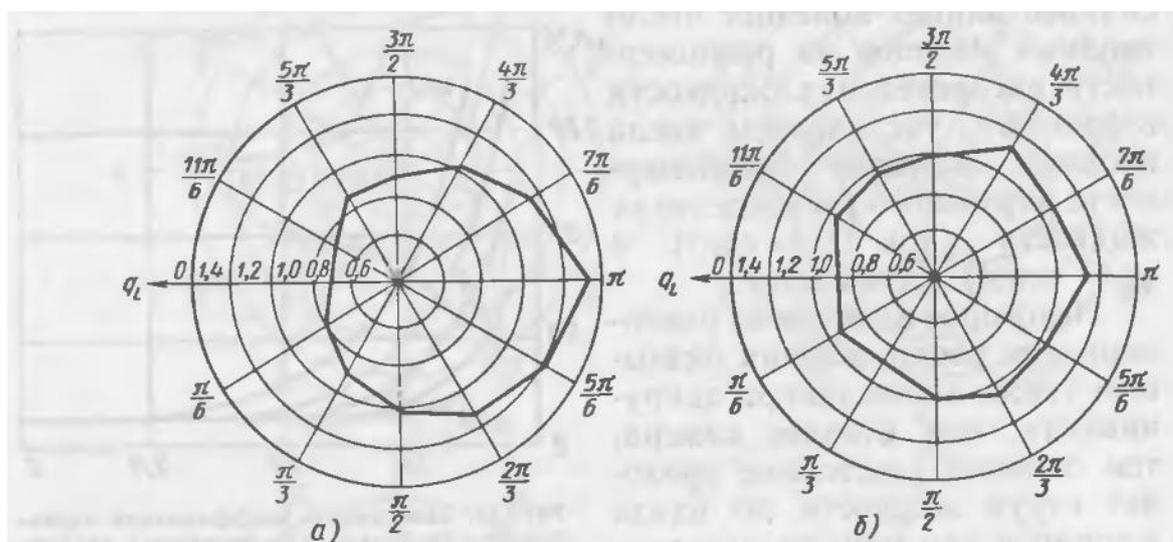


Рисунок 2.12 – Диаграммы распределения жидкости в факеле для форсунок с различным эксцентриситетом ε сопла относительно камеры закручивания
а) $\varepsilon=1,23$; б) $\varepsilon=0,04$.

Для того чтобы найти связь между эксцентриситетом ε_0 и коэффициентом неравномерности распределения жидкости в факеле распыливания, в первом приближении предполагается, что наличие эксцентриситета приводит к сдвигу оси газового вихря относительно оси сопла на величину, равную этому эксцентриситету (рис 2.13). Очевидно, что при постоянной осевой составляющей скорости течения расход жидкости через различные зоны живого сечения потока в сопле пропорционален площади этих зон.

Если разделить сопло на 12 секторов (по числу секторов в сборнике), то в принятых допущениях коэффициент неравномерности распределения жидкости в факеле будет равен разности между максимальной и минимальной площадью живого сечения потока жидкости в секторах сопла, деленной на среднее значение этой площади.

Площадь живого сечения потока в секторе определяется по формуле:

$$f_{12} = \frac{1}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} r_c^2 d\beta - \frac{1}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} r^2 d\beta \quad (2.15)$$

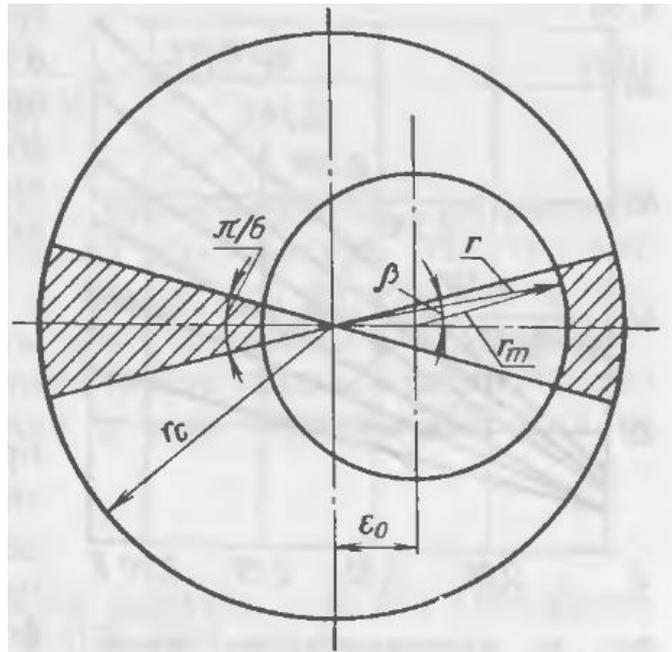


Рисунок 2.13 – Расчетная схема смещения газового вихря в сопле форсунки

Величину r легко выразить через эксцентриситет ε_0 и радиус вихря r_m :

$$r = \varepsilon_0 \cdot \cos \beta + \sqrt{r_m^2 - \varepsilon_0^2 \cdot \sin^2 \beta} \quad (2.16)$$

Подставляя это выражение в уравнение (2.15), находим площадь живого сечения потока в секторе, и получаем

$$K = \frac{103,5 \cdot \bar{\varepsilon} \cdot \sqrt{1 - \varphi_c}}{0,523 \cdot \varphi_c - 0,128 \cdot \varepsilon^2} \quad (2.17)$$

где $\bar{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon_0}{r_c}$ - относительное биение сопла.

В большинстве случаев $\varphi_c \geq 0,15$ и $\bar{\varepsilon} \leq 0,15$. При этом членом $0,128 \cdot \varepsilon^2$ в знаменателе уравнения (2.17), с погрешностью, не превышающей 3%, можно пренебречь. Тогда

$$K = \frac{198 \cdot \bar{\varepsilon} \cdot \sqrt{1 - \varphi_c}}{\varphi_c} \quad (2.18)$$

При $\bar{\varepsilon} = const$ неравномерность распределения жидкости в факеле возрастает с уменьшением φ_c , т.е. с увеличением угла факела распыливания и уменьшением коэффициента расхода форсунки. В интервале $0,2 \leq \varphi_c \leq 0,5$ теоретическая зависимость K от φ_c записывается в виде:

$$K = \frac{124,4 \cdot \bar{\varepsilon}}{\varphi_c^{1,22}} \quad (2.19)$$

Справедливость выражения (2.19) проверена значительным числом экспериментов. Зависимость между величинами K , φ_c и $\bar{\varepsilon}$ находили методом корреляционного анализа больших партий форсунок (50 – 150 шт.).

Форсунки каждой партии имели одинаковые размеры, т.е. $\varphi_c = const$ (партии различались величиной $\varphi_c = 0,217 \div 0,488$) и различные значения $\bar{\varepsilon} = 0,01 \div 0,3$. Для всех партий форсунок имела место тесная корреляционная связь между K и $\bar{\varepsilon}$. Для каждой партии находились линии регрессии, изображенные на рис.2.14. Линии регрессии представляют собой прямые линии, наклон которых зависит от значения φ_c . Линии регрессии не проходят через начало координат: $\bar{\varepsilon} = 0$ коэффициент неравномерности $K \approx 10\%$, что соответствует среднестатистическому значению K для закрытой форсунки, не имеющей технологических дефектов.

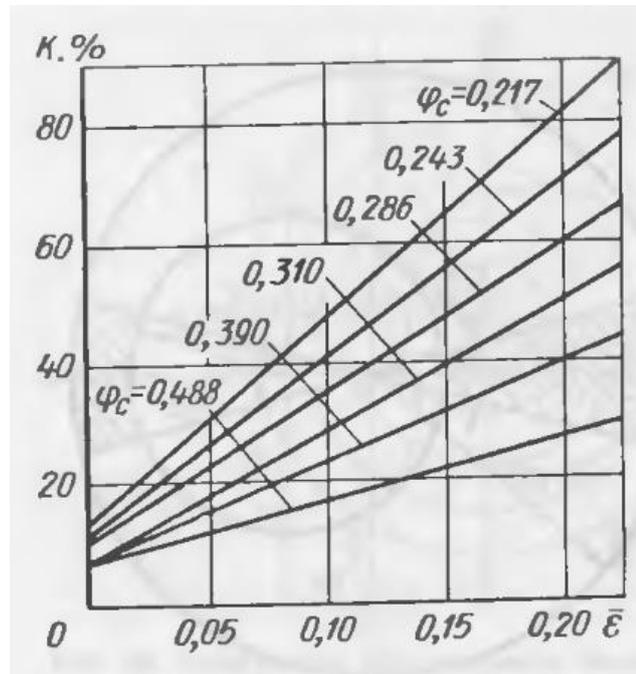


Рисунок 2.14 – Экспериментальная зависимость $K = f(\bar{\varepsilon})$ для форсунок с различными значениями φ_c

В исследованном диапазоне изменения $\bar{\varepsilon}$ и φ_c зависимость $K = f(\bar{\varepsilon}, \varphi_c)$ может быть представлена в виде:

$$K = \frac{49,43 \cdot \bar{\varepsilon}}{\varphi_c^{1,25}} + 10 \quad (2.20)$$

Из сопоставления уравнений (2.19) и (2.20) следует, что показатели степени, полученные теоретически и экспериментально, близки между собой, но экспериментальная кривая имеет более пологий характер. Последнее можно объяснить тем, что в действительности газовый вихрь смещается относительно сопла не на величину эксцентриситета, как было принято в расчете, а меньше.

Длина камеры закручивания заметно влияет на величину коэффициента неравномерности распределения для форсунок независимо от различий биения сопла. Чем длиннее камера, тем меньше эксцентриситет сопла сказывается на равномерности распределения жидкости в факеле распыливания. В общем случае зависимость (2.20) полученная при $L_K / D_K \leq 0,3$ принимает вид

$$K = \frac{34,6 \cdot \bar{\varepsilon}}{\varphi_c^{1,25} \cdot \left(\frac{L_K}{D_K}\right)^{0,5}} + 10 \quad (2.21)$$

Из выражений (2.20) и (2.21) следует, что чем меньше коэффициент расхода форсунки и больше конусный угол факела, тем труднее равномерно распределить жидкость вокруг оси факела и тем точнее нужно выдержать соосность сопла и камеры закручивания. Чтобы свести к минимуму эксцентриситет сопла, целесообразно изготавливать распылитель форсунки в виде неразъемной детали.

2.3. Размеры капель при распыливании

Пленка жидкости, вытекающей из центробежного распылителя, не обладает стабильной формой. Проведенное многими исследователями фотографирование пленки показывает, что она претерпевает ряд деформаций, вызванных как турбулентностью, так и взаимодействием с окружающей средой. С увеличением напора место распада пленки приближается к устью сопла форсунки и при определенных скоростях распад происходит непосредственно у выходного отверстия распылителя [1].

Выберем в качестве определяющего размера диаметр выходного сопла распылителя. Рассмотрим случай, когда распыливание происходит в неподвижный газ ($v_c=0$). При скоростях истечения, имеющих место в

центробежных распылителях, влиянием силы тяжести на распад можно пренебречь.

Геометрические параметры, характеризующие распылитель, в данном случае будут A , D_k/d_0 и h/d_0 .

A – геометрическая характеристика форсунки, показывающая отношение тангенциальной скорости на внешней границе струи к эквивалентной скорости.

Поскольку распыливание получается в результате взаимодействия сил поверхностного натяжения, вязкостных сил и сил, обусловленных внешним действием среды, то критерии определяющие распыливание, могут быть получены из учета соотношения перечисленных сил.

Отношение сил поверхностного натяжения к силам вязкости дает критерий $\frac{\sigma}{\mu_{ж} v}$ (1). Отношение сил воздействия потока на жидкость дает критерий $\frac{\rho_2 v d_0}{\mu_{ж}}$

(2). Отношение инерционных сил жидкостей к взаимодействию газового потока

дает $\frac{\rho_{ж}}{\rho_2}$ (3). Удобно поделить $\frac{\rho_2 v d_0}{\mu_{ж}} / \frac{\rho_{ж}}{\rho_2} = Re$. Комбинируя критерии 1, 2 и 3,

чтобы исключить скорости можно получить $\frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж} \cdot \sigma \cdot d_0}$.

В качестве искомой величины при определении размеров естественно выбрать отношение среднего диаметра капли к диаметру прожимного отверстия сопла.

Таким образом, общая зависимость имеет вид:

$$\frac{d}{d_0} = f\left(A, \frac{D}{D_0}, \frac{h}{d_0}, Re_{ж}, \frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж} \cdot \sigma \cdot d_0}, \frac{\rho_{ж}}{\rho_2}\right) \quad (2.22)$$

где d – средний размер капли.

Что касается вида зависимости и влияния отдельных критериев, то их можно установить только опытным путем. При этом следует заметить, что величина $\frac{\rho_{ж}}{\rho_2}$ меняется сравнительно мало.

Опыты показывают, что из геометрических факторов на дисперсность струи заметно влияет, по существу, только величина A , Если отыскивать зависимость (2.22) в виде степенного комплекса, то она примет вид:

$$\frac{d}{d_0} = C \cdot A^n \cdot \text{Re}_{\text{жс}}^m \cdot \left(\frac{\mu_{\text{жс}}^2}{\rho_{\text{жс}} \cdot \sigma \cdot d_0} \right)^k \quad (2.23)$$

В работе [26] распыливание жидкости осуществлялось серией распылителей в атмосферу. Поэтому не представлялось возможным выявить влияние физических параметров среды газа, в который распыливается жидкость. Были проведены опыты при параметрах $A = 1,72 \div 9,51$, $\frac{\mu_{\text{жс}}^2}{\rho_{\text{жс}} \cdot \sigma \cdot d_0} = 8 \cdot 10^{-6} \div 10^{-2}$, $\text{Re}_{\text{жс}} = 800 \div 25000$.

В первой серии опытов испытывались форсунки различных геометрических размеров с одной и двумя тангенциальными канавками при работе их с водой и растворами глицеринового мыла в воде. Это дало возможность изменять поверхностное натяжение жидкости при практически неизменных вязкости и плотности. Во второй серии опытов испытывалась одна форсунка при работе на воде и водных растворах глицерина. Это дало возможность изменять в широких пределах вязкость жидкости при практически неизменных плотности и поверхностном натяжении. Исследование доказало независимость относительного среднего диаметра капель $\frac{d}{d_0}$ от параметров $\frac{D_{\text{к}}}{d_0}$ и $\frac{h}{d_0}$.

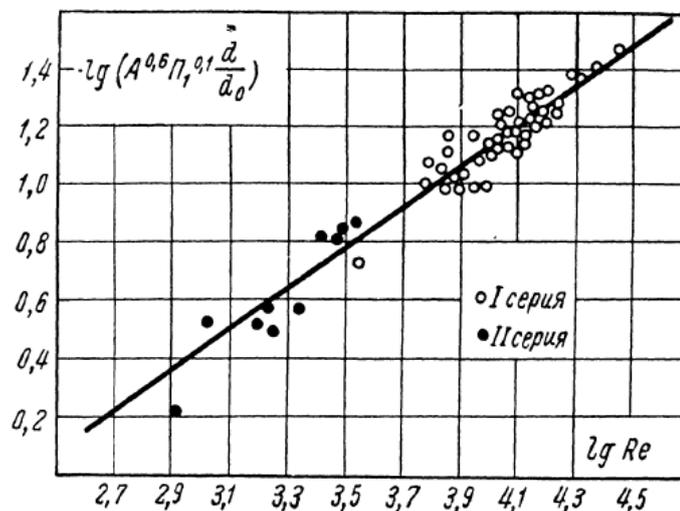


Рисунок 2.15 – Зависимость среднего диаметра капель от физических свойств жидкости, скорости истечения и размеров распылителя

Чтобы определить размеры капель, последние улавливались в смеси вазелина с трансформаторным маслом. Нанесенной на стеклянную пластинку. После этого отдельные участки пластинки фотографировались под микроскопом, а затем капли подсчитывались по размеру.

Опытные данные, представленные на рис. 2.15 обобщены формулой:

$$\frac{d}{d_0} = 47,8 \cdot A^{-0,6} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}^2}{\rho_{жс} \cdot \sigma \cdot d_0} \right)^{-0,1} \cdot \left(\frac{v_э \cdot d_0}{v} \right)^{-0,7} \quad (2.24)$$

В работе [27] приводятся данные по распыливанию керосина ($\gamma=0,805$) центробежными распылителями в виде зависимости:

$$d_s = f(K, \sqrt{p}), \quad (2.25)$$

где $K = \frac{Q}{\sqrt{p}} = C \cdot \xi^2 \cdot \omega$ - число истечения;

Q – объемный расход жидкости;

p – избыточное давление перед распылителем;

ω - площадь поперечного сечения выходного сопла;

C – коэффициент пересчета размерности;

d_s – средний диаметр капель.

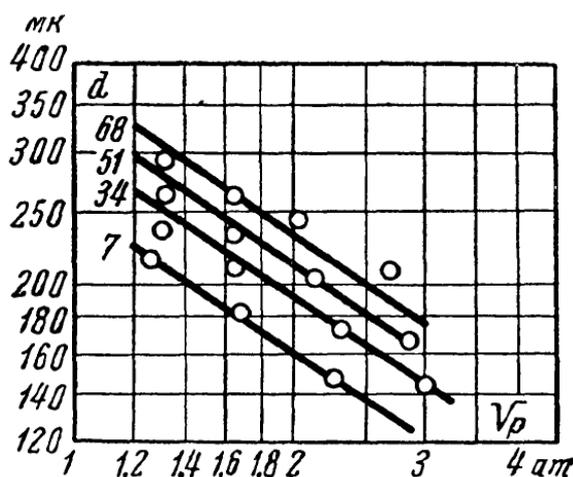


Рисунок 2.16 – Зависимость среднего диаметра капель от давления (цифры у линий – значения K , л/час)

На рис. 2.16 представлена зависимость среднего весового диаметра капель d от \sqrt{p} при постоянном значении K . Для случая распыливания жидкости каким-

либо одним распылителем линии на рис 2.16 представляют зависимость среднего диаметра капель от расхода, так как в этом случае коэффициент расхода остается постоянным.

Аналитически эта зависимость представляется формулой:

$$d \sim (\sqrt{p})^{0.7} \quad (2.26)$$

На рис. 2.17 представлена критериальная зависимость (2.24). Рассмотрение рис 2.17 приводит к заключению, что опытные данные [27] могут быть обобщены формулой (2.3, линия 1). Отклонения точек, не превышающие тех, которые наблюдались в работе [26], имеют место главным образом при числах $Re < 10^4$, когда условия истечения из форсунки, исследованной в работе [26], заметно отличались от условий для идеальной форсунки, в то время как по данным работы [27] таких отклонений во всем исследованном диапазоне не наблюдалось. Кроме того, и сами конструкции форсунок могли несколько различаться.

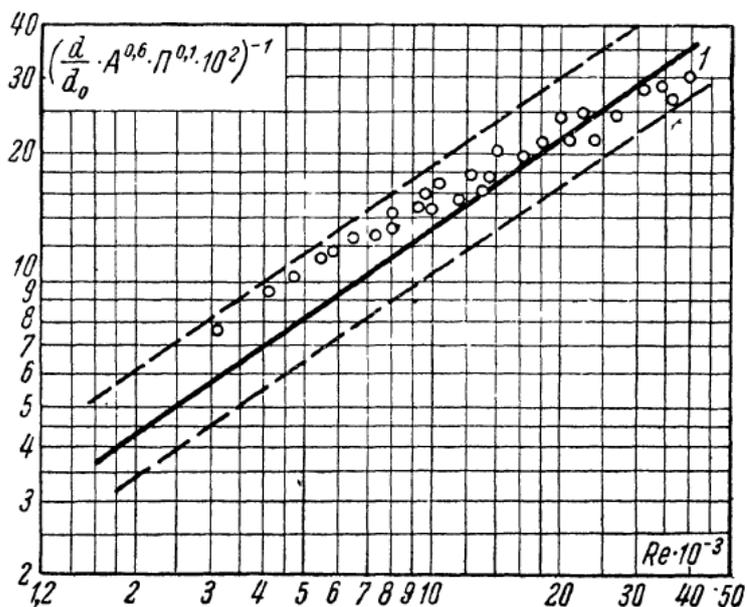


Рисунок 2.17 – Зависимость (2.3)

В опытах [28] исследовалось распыливание бензойной кислоты и β -нафтола центробежными форсунками, изображенными на рис. 2.18 при нескольких значениях диаметра выходного сопла.

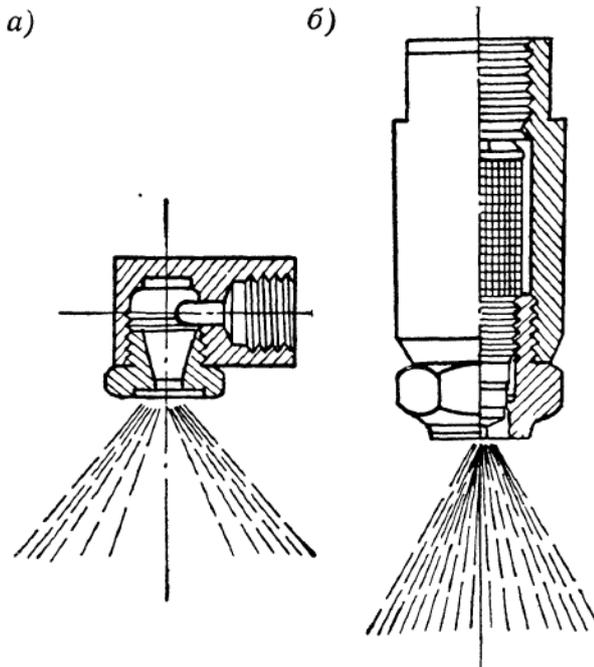


Рисунок 2.18 – Схемы распылителей [28]

Дисперсность определялась методом замораживания капель и последующим подсчетом числа капель в группах, причем размеры капель внутри каждой группы отличались друг от друга не более чем на 20 мк. Обработка в критериальной форме опытных данных приводит к следующим зависимостям для определения среднего диаметра капель: применительно к форсунке, изображенной на рис 2.18 а.

$$\frac{d_l}{d_0} = 3,38 \cdot A^{-0,1} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}^2}{\rho_{жс} \cdot \sigma \cdot d_0} \right)^{-0,16} \cdot Re^{-0,54} \quad (2.27)$$

Применительно к форсунке, изображенной на рис. 2.18 б

$$\frac{d_l}{d_0} = 2,23 \cdot \left(\left(\frac{d_0}{d=1} \right)^{0,04} \cdot \frac{\mu_{жс}^2}{\rho_{жс} \cdot \sigma \cdot d_0} \right)^{-0,17} Re^{-0,44} \quad (2.28)$$

где $\frac{d_0}{d=1}$ - безразмерный диаметр выходного отверстия

На рис. 2.19 представлены опытные данные по испытаниям форсунки (рис. 2.18 а). Для сопоставления величин среднего диаметра капель по формулам (2.24) и (2.27) проведен сравнительный расчет при конкретных условиях ($П_1=10^{-5}$ и $A=2$), показывающий, что в рассматриваемом случае величины средних диаметров капли близки друг другу (таб. 2.2).

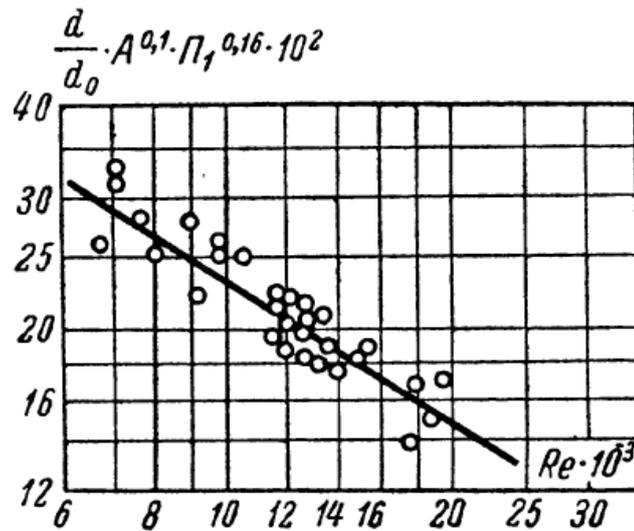


Рисунок 2.19 – Зависимость (2.23) [28]

Опытные данные ряда авторов обобщены [29] формулой при постоянном значении коэффициента поверхностного натяжения:

$$d_s = 77,5 \cdot p^{0,458} \cdot G^{0,209} \cdot \nu^{0,215} \quad (2.29)$$

где p – избыточное давление, кГ/см^2 ;

G – весовой расход, кг/час ;

ν – коэффициент кинематической вязкости, сантистоксы ;

d_s – средний диаметр капель, мм .

Таблица 2.2 – Сопоставление величин среднего диаметра капель

Re	$\frac{d}{d_0}$ по формуле (2.24)	$\frac{d_l}{d_0}$ по формуле (2.25)
5000	0,257	0,232
10000	0,158	0,143
20000	0,098	0,095

Если положить, что зависимость от коэффициента поверхностного натяжения соответствует критериальной формуле (2.24), то зависимость (2.29) преобразуется к безразмерному виду:

$$\frac{d_s}{d_0} = 11,5 \cdot \xi^{0,91} \cdot \Pi_1^{-0,24} \cdot \text{Re}^{-0,7} \quad (2.30)$$

где $\xi = f(A)$ – коэффициент расхода форсунки

Имеется еще ряд зависимостей, предложенных различными исследователями. Так, например, Струлевич [41], распыливая парафин

центробежными распылителями и пользуясь методом замораживания капель с последующим определением их размеров, пришел к формулам:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta}{r_0} &= \frac{1 - \sqrt{1 - \xi \cos \frac{\varphi}{2}}}{\cos \frac{\varphi}{2}} \\ \frac{\delta}{d_0} &= 0,11 \text{Re}^{0,34} \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

где φ - корневой угол факела;

δ - толщина пленки;

d_0 – средний диаметр капель;

$$\text{Re} = \frac{v \cdot \delta \cdot \rho_{жс}}{\mu_{жс}} \quad (2.32)$$

v – скорость истечения;

r_0 – радиус сопла.

Лонгвелл [40] предложил формулу:

$$\frac{d_m}{d_0} = \frac{0,135e^{0,7v}}{\Delta p^{0,37} \sin \frac{\varphi}{2}} \quad (2.33)$$

где Δp – перепад давления (изменялся от 0,5 до 21 ати)

v – 0,08-0,8 см²/сек

φ - угол конусности струи;

d_m – медианный диаметр по массе.

В этой формуле не учитывается влияние поверхностного натяжения жидкости, а влияние конструкции определяется углом конусности струи. В обработке Шефера и Боуэя [40]:

$$\frac{d}{d_0} = f\left(\frac{\rho \cdot v_s^2 \cdot d_0}{\sigma}\right) \quad (2.34)$$

Здесь не учитывается влияние вязкости на средний диаметр капель.

В работе [30] исследовали распыливание воды с примесью 25% нигрозина для того, чтобы капли можно было фотографировать; изменения вязкости раствора авторы добивались, прибавляя в него глюкозу разной концентрации.

Дисперсность они определяли, улавливая капли в сосуд, заполненный специальным раствором, который не смешивался с водой и имел такую же плотность, что и она. Благодаря этому капли сохраняли сферическую форму и едва касались дна. Сосуд покрывали стеклом и производили фотомикрографию капель. Подсчет капель производили визуально и специальным электронным анализатором распределения капель по размерам. Авторы определяли зависимость среднего диаметра капель от составляющих скорости вдоль оси при выходе из сопла и касательной при входе в камеру форсунки, а также от диаметра сопла. В работе применялись центробежные форсунки с завихряющими канавками (рис 2.20).

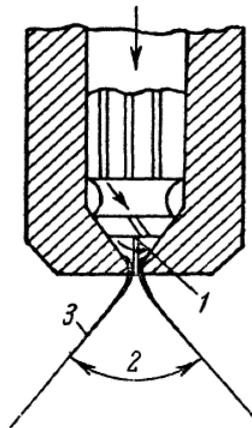


Рисунок 2.20 – Схема распылителя [30]

1 – воздушный вихрь, 2 - угол конусности, 3 – полая коническая струя.

Обработка данных в критериях подобия привела к следующей зависимости:

$$\frac{d}{d_0} = 2,9 \left(\frac{v_{\tau_0}}{v_3} \right)^{-0,5} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}^2}{\rho_{жс} \cdot \sigma \cdot d_0} \right)^{-0,24} \cdot Re^{-0,7} \quad (2.35)$$

где v_3 – эквивалентная скорость на выходе из сопла;

v_{τ_0} - касательная составляющая скорости на выходе из завихряющих канавок.

Отношение этих скоростей представляет собой некоторую геометрическую характеристику данного распылителя, равную:

$$\frac{v_{\tau_0}}{v_3} = \frac{f_0 \cos \theta}{\eta f_{ex}} \quad (2.36)$$

где f_0 – площадь выходного сопла форсунки;

n – число завихряющих канавок;

f_{ex} – площадь их поперечного сечения;

θ – угол отклонения их от тангенциального расположения.

Опытные данные в координатах зависимости (2.9) представлены на рис.2.21.

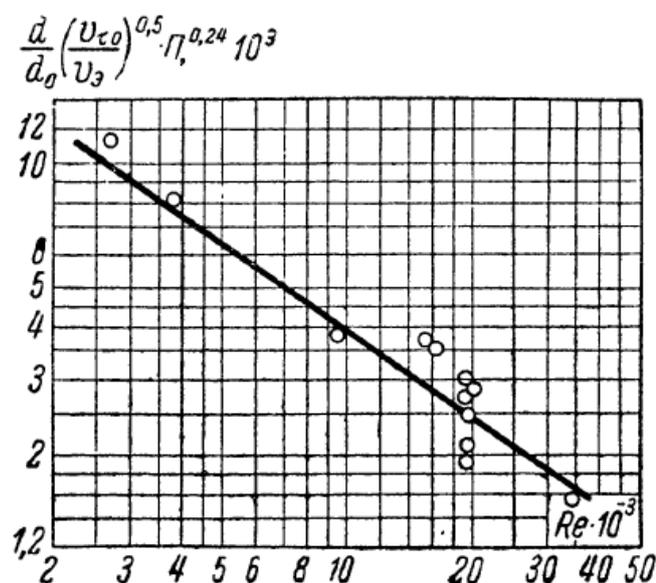


Рисунок 2.21 – Зависимость (2.35) [30]

Средний диаметр капель и в этом случае изменяется пропорционально $Re^{-0,7}$.

Сопоставление этих данных показывает, что степень влияния отдельных параметров на величину среднего диаметра капель различна в разных исследованиях. Так при увеличении скорости (избыточного давления) диаметр капель уменьшается, но показатель степени при скорости различен, изменяясь от -0,34 до -0,1; в большинстве работ он близок к -0,7. Размер выходного сопла распылителя существенно влияет на дисперсность; в подобных распылителях (постоянное значение параметра A) увеличение диаметра выходного сопла приводит к ухудшению дисперсности $d \sim d_0^{0,4+0,64}$.

Физические свойства жидкости оказывают следующее влияние: увеличение вязкости в большинстве случаев ухудшает распыливание, но степень влияния различна ($d \sim \mu_{ж}^{0,2+0,5}$) в зависимости от области изменения вязкости; при малых значениях вязкости влияние ее на распыливание ослабевает. Таким образом, при распыливании высоковязкого топлива необходимо учитывать влияние этого

фактора. Подогрев топлива, понижая его вязкость, улучшает условия распыливания. Что касается поверхностного натяжения, то по данным большинства авторов, оно слабо влияет на степень дисперсности $d \sim \sigma^{0,1 \div 0,2}$. Иной вывод содержится лишь в работе Шефера [40], где $d \sim \sigma^{0,5}$. Влияние этого фактора в ряде исследований вообще не учитывалось в связи с тем, что изменение его невелико для различных сортов жидкого топлива.

На рис. 2.22 сопоставлены зависимости среднего диаметра капель от давления, подсчитанные по разным формулам для конкретного случая распыливания центробежной форсункой керосина ($\gamma=815 \text{ кг/м}^3$, $\sigma=27 \cdot 10^{-3} \text{ кГ/м}$, $\mu_{\text{ж}}=2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{сек}$). Рассмотрение кривых приводит к заключению, что при давлении более 10 ати линии 1 и 2 дают близкие результаты, линии же 3 и 4 дают несколько меньшие значения диаметра. Таким образом, вероятно, не все факторы, влияющие на распыливание жидкости, учтены критериями и входят в экспериментальные константы, которые учитывают индивидуальные особенности распылителей, в частности различную начальную турбулентность.

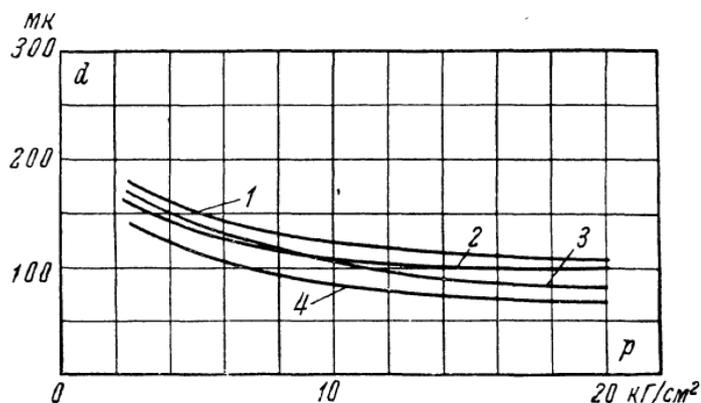


Рисунок 2.22 – Сравнение зависимостей среднего диаметра капель от давления, подсчитанных по разным формулам. 1 – (2.24); 2 – (2.27); 3 – (2.30); 4 – (2.33).

Конечно, детали конструкции форсунки, отношение высоты камеры к диаметру, число тангенциальных отверстий и даже форма их в различных работах не были одинаковыми. Имелись конструктивные отличия и в переходах от камеры завихрения к прожимному соплу. Все это приводит к тому, что безразмерная величина средней капли, определенная по критериям подобия, даже при равных условиях не может быть одной и той же. Важно, однако, что для

опытов каждого автора, когда конструкция форсунки сохранялась одинаковой обработка в критериях:

$$\frac{d}{d_0} = f\left(A, \text{Re}_{ж}, \frac{\mu_{ж}^2}{\rho_{ж} \cdot \sigma \cdot d_0}\right) \quad (37)$$

дает однозначную зависимость. Это показывает, что выбранные критерии правильно описывают действительные условия по распыливанию жидкости, но не учитывают и не могут учитывать конструктивных особенностей отдельных форсунок. Для форсунок с тангенциальным подводом топлива при ориентировочных расчетах может быть рекомендована формула (2.24).

Все рассмотренные исследования проводились при истечении жидкости в среду воздуха, находящегося при атмосферном давлении. Это не дало возможности выявить влияние плотности газа (противодавления) на распыливание. Исследования по этому вопросу проводились при распыливании жидкости дизельными форсунками, работающими при больших избыточных давлениях. При этом получены противоречивые результаты. Так, [32] и [31] не обнаружили заметного влияния плотности воздуха на дисперсность струи, а [33], Джиферен и Лэмб [40] и [34] отметили уменьшение диаметра капель при увеличении плотности воздуха.

Исследованию центробежных распылителей (рис. 2.23) посвящена работа [35]. Размеры капель определялись фотографированием их в полете и последующим подсчетом количества капель по размерам под микроскопом. Средний диаметр капель определялся для разных углов, образованных плоскостью, в которой производилось фотографирование, и осью струи, на заданном расстоянии от выходного сопла.

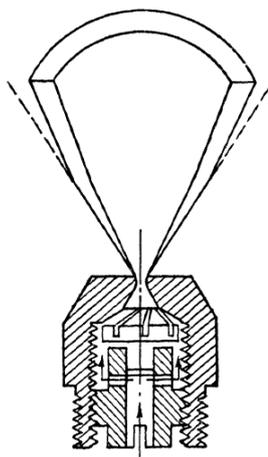


Рисунок 2.23 – Схема распылителя [35]

Размеры капель по сечению не остаются постоянными: наименьшие капли располагаются вблизи оси струи; по мере удаления от оси капли становятся крупнее и затем на внешней границе струи несколько уменьшаются.

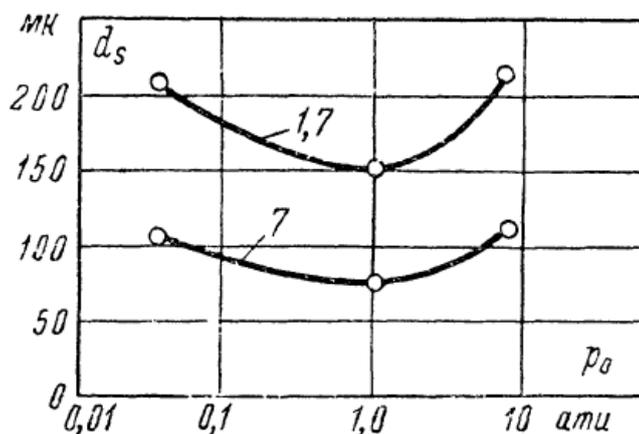


Рисунок 2.24 – Зависимость среднего диаметра капель от противодавления (цифры у кривых – значения Δp , атм).

Средний диаметр капель зависит от противодавления (рис. 2.24); по мере его роста средний диаметр капель сначала уменьшается, а затем начинает возрастать. Увеличение размеров капель автор объясняет слиянием капель, которое происходит при больших плотностях орошения, имеющих место в случае повышенного давления в камере.

Зависимость среднего диаметра капель от перепада давления в форсунке выражается степенной формулой:

$$d_s = K \cdot (p)^{-n}, \quad (2.38)$$

где K – постоянная, зависящая для данной жидкости от геометрических размеров распылителя и величины противодействия

n – в исследованном диапазоне противодействий приблизительно равна 0,48, что соответствует несколько более сильной зависимости от скорости, чем в формуле (2.24).

При расчете центробежных распылителей надо иметь в виду зависимость расхода и среднего диаметра капель от давления и размеров распылителя. Так, для заданного типа форсунок ($A=const$) расход возрастает при заданном p пропорционально d_0^2 , а при заданном d_0 - пропорционально \sqrt{p} . В то же время средний диаметр капель при заданном перепаде давления возрастает пропорционально $d_0^{0,5}$, а при заданном d_0 - обратно пропорционально $p^{0,35}$.

Таким образом, увеличение производительности при необходимости сохранения величины среднего диаметра капель требует повышения давления перед распылителем. На практике для увеличения производительности устанавливают в камере несколько распылителей. Зависимость расхода и диаметра капель от давления ограничивает пределы регулировки подачи топлива, так как уменьшение расхода топлива в заданном распылителе связано с необходимостью уменьшения давления, что неизбежно ухудшает дисперсность. Поэтому при необходимости регулировать расход в широких пределах либо создают специальные устройства с рециркуляцией топлива внутри форсунки, в которых распыливание топлива происходит не только за счет центробежного эффекта, но и вследствие взаимодействия топлива с высокоскоростной струей воздуха. Применение пневматических форсунок дает возможность получать факел заданной дисперсности при различных расходах, что улучшает условия эксплуатации распылителей.

2.4. Изменение диаметра капель

Основными параметрами, характеризующими процесс дробления жидкости на капли, являются числа Вебера We и Лапласа Lp .

Число Вебера – критерий подобия, определяющий отношение инерции жидкости к поверхностному натяжению. Известна классификация [23], согласно которой разделяют пять основных режимов дробления жидкости по числу We :

1. Вибрационное дробление, $We = 8 \div 12$;
2. Дробление по типу «парашют», $12 < We < 50$;
3. Дробление по типу «парашют» со струйкой, $50 < We < 100$;
4. Срыв пограничного слоя жидкости с экватора капли, $100 < We < 350$;
5. Срыв микрокапель с гребешков волн, возникающих на наветренной поверхности капли, $We > 350$;

Число Лапласа – критерий подобия, выражающий соотношение между силой поверхностного натяжения и диссипативным силами.

При расчете размера капель, представленном в [3, 4] задаются следующими параметрами: производительностью форсунки G , $m^3/ч$, числом витков форсунки n , корневым углом факела β° , расстоянием от орошаемой поверхности от нижнего торца форсунки h , м.

Порядок расчета следующий.

1. Определение диаметра осевого отверстия (доля расхода через осевое отверстие принимается 5 – 15 %), мм:

$$d_o = d_c \cdot \sqrt{(0,05 \div 0,15) \cdot G} \quad (2.39)$$

2. Определение диаметра нижнего торца форсунки, мм:

$$d = d_o + 2 \cdot b \quad (2.40)$$

3. Определение шага витка, мм:

$$t = \frac{l}{n_s}, \quad (2.41)$$

где l – длина форсунки, мм.

4. Определение высоты витков, мм:

$$s = (0,4 \div 0,6) \cdot t \quad (2.42)$$

5. Определение максимального угла наклона рабочей плоскости верхнего витка, $^\circ$:

$$\theta_{\max} = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left[\frac{(1+h) \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} - \frac{d_o}{2} \cdot (1-n_s)}{n_s \cdot h} \right] \quad (2.43)$$

6. Расчет геометрической характеристики форсунки

$$A = \frac{(t-s) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot l}{t} \quad (2.44)$$

7. Определение среднего объемно-поверхностного диаметра капель

$$\frac{d_{32}}{d_c} = 50,25 \cdot \left(\frac{d_c}{A} \right)^{-0,2} \cdot We^{0,42} \cdot Lp^{-0,08} \quad (2.45)$$

Стоит отметить, что результаты расчета считаются справедливыми при следующих значениях критериев.

$$1. \quad \frac{d_c}{A} = 5 \div 24$$

$$2. \quad \text{Число Вебера } We = (0,4 \div 0,17) \cdot 10^3$$

$$We = \frac{\omega_{ж}^2 \cdot l \cdot \rho_{ж}}{\sigma} \quad (2.46)$$

где $\omega_{ж}$ – относительная скорость жидкости, м/с;

l – характерный линейный размер распылителя, м;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³;

σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

$$3. \quad \text{Число Лапласа } Lp = (0,07 \div 10) \cdot 10^4$$

$$Lp = \frac{\sigma \cdot l \cdot \rho_{ж}}{\mu_{ж}^2} \quad (2.47)$$

где $\mu_{ж}$ – вязкость жидкости, Па·с.

Выполнив расчеты при различных значениях производительности форсунки, были получены следующие результаты (таб. 2.3).

Таблица 2.3 – Результаты расчета

$G, \text{ м}^3/\text{ч}$	$d_{32}, \text{ мкм}$
0,24	325
0,27	312
0,30	301
0,33	291

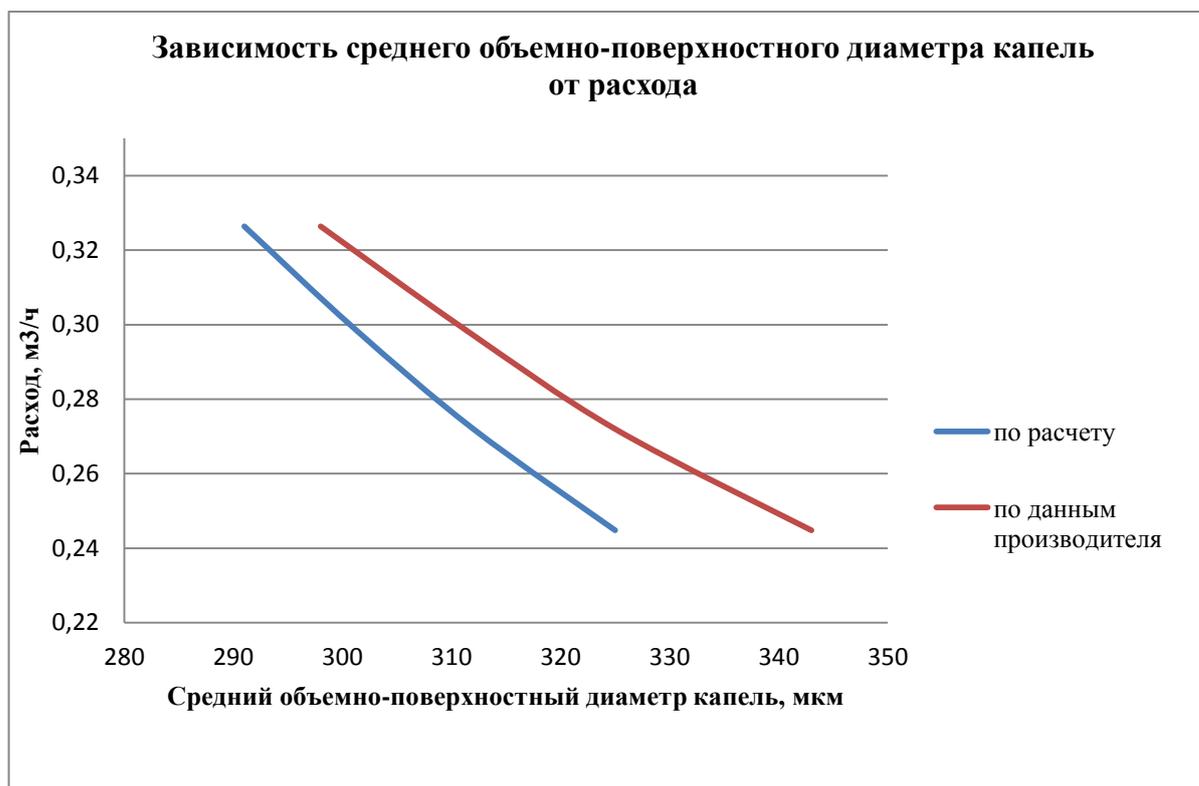


Рисунок 2.25 – Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра капель от расхода

Сопоставив значения, полученные теоретическим расчетом со значениями производителя [24], получена диаграмма, показывающая зависимость диаметра капель от расхода жидкости (рис. 2.25). Погрешность между теоретическим расчетом и данными производителя при этом составляет 5,2%. Однако в данном расчете не учитывается такой параметр как противодавление, в зависимости от которого, согласно вышеизложенной теории, изменяется корневой угол факела распыла жидкости.

Глава 3. ВЛИЯНИЕ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ НА КОРНЕВОЙ УГОЛ ФАКЕЛА. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Анализ факторов влияющих на корневой угол факела.

Целью данного эксперимента является изучение процесса распыливания жидкости, в частности влияние различных факторов на корневой угол факела. Знание угла распыла позволит рассчитать необходимые габариты напорного резервуара.

За отклик принят корневой угол факела распыла жидкости α . Исходя из проведенных теоретических исследований α является функцией следующих факторов

$$\alpha = f(Q; F_{ж.с.}; w_{ж}; w_г; t_{ж}; t_г; P_1; P_2; \rho_{ж}; \rho_г; \nu_{ж}) \quad (3.1)$$

где Q – расход очищаемой жидкости, м³/ч;

$F_{ж.с.}$ – площадь живого сечения форсунки, м²;

$w_{ж}, w_г$ – скорости жидкой и газовой сред м/с;

$t_{ж}, t_г$ – температуры жидкой и газовой сред °С;

P_1, P_2 – давления жидкой и газовой сред, Па;

$\nu_{ж}$ – вязкость жидкости, м²/с.

Так как площадь живого сечения форсунки $F_{ж.с.}$ определяется только типом форсунки и является постоянной величиной, то этот фактор можно отнести к качественным и исключить из уравнения.

Распыливание жидкости происходит в напорном резервуаре в котором отсутствует движение воздуха, следовательно, фактор $w_г$ так же исключаем из уравнения.

Расход очищаемой жидкости Q , скорость $w_{ж}$ и давление P_1 жидкости являются величинами зависимыми друг от друга. Для распыливания жидкости используется роторно-пластинчатый насос который имеет байпасную линию оснащенную предохранительно-перепускным клапаном. При попытке ограничить расход жидкости за счет дросселирования в насосе повышается

давление, и клапан обеспечивает перепуск жидкости во всасывающий патрубок. Таким образом, оказывается, невозможно изменять перечисленные факторы – они остаются практически постоянными в ходе эксперимента, следовательно, их можно исключить из уравнения (3.1).

Т.к. давление жидкости постоянно, то вязкость жидкости определяется прежде всего ее температурой, поэтому исключаем компонент $V_{жс}$ как зависящий от $t_{жс}$.

Согласно уравнению состояния идеального газа температура сжатого воздуха t_2 в напорном резервуаре будет изменяться в зависимости от величины P_2 , поэтому компонент t_2 можно исключить.

С учетом изложенного выражение (3.1) можно переписать в следующем виде:

$$\alpha = f(P_2; t_{жс}) \quad (3.2)$$

При планировании и обработке результатов эксперимента был использован метод ортогонального центрального композиционного планирования [22]. Основной задачей исследования является получение надежных количественных соотношений между откликом и факторами.

В том случае, когда линейное приближение не обеспечивает адекватного математического описания изучаемой поверхности отклика, рекомендуется использовать простейшие нелинейные математические модели, имеющие вид полиномов второго порядка

$$y = b_0 + \sum_{u=1}^q k_u \cdot x_u + \sum_{\substack{u=1; c=1 \\ u \neq c}}^C k_{uc} \cdot x_u \cdot x_c + \sum_{u=1}^q k_{uu} \cdot x_u^2 \quad (3.3)$$

где q – число факторов;

C – общее число возможных межфакторных парных взаимодействий;

u, c – номера основного и взаимодействующего факторов;

k_u, k_{uc}, k_{uu} – коэффициенты регрессии: при линейных членах, парных взаимодействиях и эффектах второго порядка.

Такие модели в большинстве случаев позволяют с достаточной точностью описывать поведение исследуемого объекта в окрестности экстремальной точки, называемой «почти стационарной областью». Однако в силу ряда причин экспериментальное определение числовых характеристик многофакторных полиномиальных моделей второго порядка представляет собой гораздо более сложную процедуру, требующую использования специальных методов планирования эксперимента, которые будут рассмотрены в настоящем разделе.

3.2. Общие положения планирования второго порядка

Планы второго порядка принципиально отличаются тем, что варьирование факторов на двух уровнях не является достаточным для получения математического описания криволинейных поверхностей отклика, так как через две точки можно провести бесконечное множество линий различной кривизны. Поэтому для нахождения коэффициентов квадратичных математических моделей необходимы планы, в которых каждый фактор варьировался бы не менее чем на трех уровнях.

Общее число коэффициентов регрессии в полиномах второго порядка L_2 определяется выражением (3.3):

$$L_2 = 2q + C + 1 = 2q + \frac{q(q-1)}{2} + 1 \quad (3.4)$$

Это выражение позволяет подсчитать минимальное число опытов ($N_{min} = L_2$), требуемое для расчета коэффициентов полиномиальной математической модели второго порядка при различном количестве факторов. Если каждый фактор варьировать на трех уровнях, используя схему полнофакторного эксперимента, то фактическое количество опытов $N_{ПФЭ}$ составит

$$N_{ПФЭ} = 3^q \quad (3.5)$$

Результаты расчетов по формулам (3.4) и (3.5) представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Требуемое и фактическое число опытов при различных методах планирования второго порядка

Число опытов	Значения N при числе факторов q , равном				
	1	2	3	4	5
Требуемое, N_{\min}^{mp}	3	6	10	15	21
По плану ПФЭ- 3^q	3	9	27	81	243
По плану РДР- 3^{q-1}	-	-	-	27	81
По плану ЦКП (ядро ПФЭ- 2^q)	5	9	15	25	43
По плану ЦКП (ядро ПФЭ- 2^{q-1})	4	7	11	17	27

Примечания. 1. Прочерки поставлены в ячейках, где опытов не хватает.
 2. Жирным шрифтом выделены планы с рекомендуемым числом опытов.

Анализ данных, представленных в двух первых строках этой таблицы, убеждает нас в том, что использование полнофакторных трехуровневых планов ПФЭ- 3^q становится невыгодным уже при $q \geq 3$ из-за сильного превышения числа планируемых опытов над потребностью. Гораздо большую эффективность эксперимента в данном случае способен обеспечивать метод центрального композиционного планирования (ЦКП), который заключается в последовательной достройке обычных линейных планов ПФЭ- 2^q или РДР- 2^{q-m} до соответствующих планов второго порядка. Основная идея метода ЦКП заключается в том, что к двухуровневым планам, образуящим так называемое «ядро» плана второго порядка, добавляется несколько специальных точек, позволяющих дополнительно варьировать факторы еще на нескольких уровнях. Эти точки в графической интерпретации обычно обозначаются символом * (звездочкой). Поэтому их принято называть «звездными точками». Расстояние от центра (нулевого уровня) эксперимента до звездных точек обозначается символом α и называется «звездным плечом». Все точки композиционных планов второго порядка (основные и звездные) располагаются симметрично вокруг центра эксперимента, поэтому такие планы называются центральными. Графические интерпретации центральных композиционных планов второго порядка для двух- и трехфакторного эксперимента представлены на рис. 3.1.

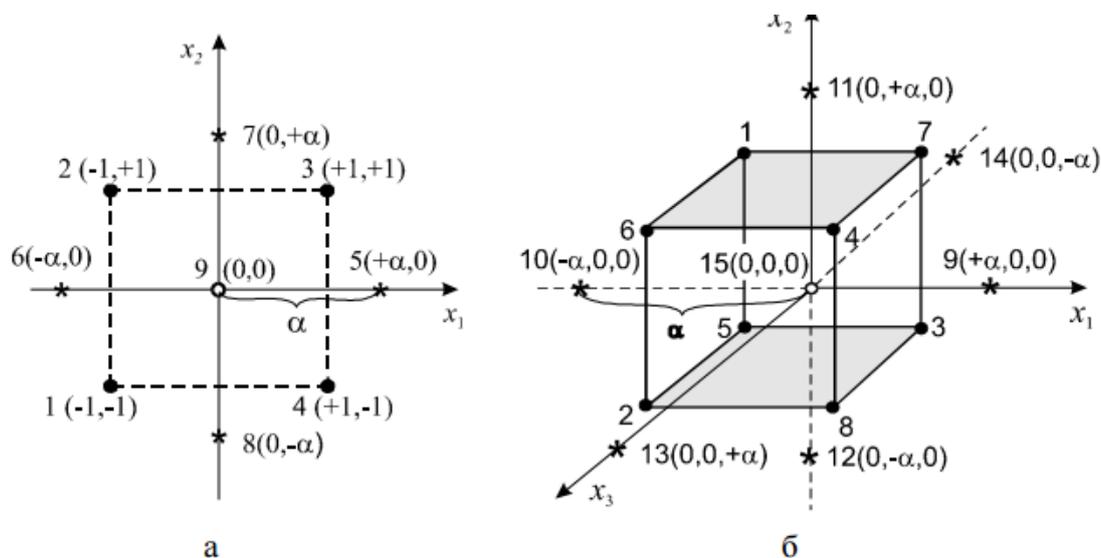


Рисунок 3.1 – Графические интерпретации центральных композиционных планов второго порядка: а – для двухфакторного эксперимента $q=2$, б – для трехфакторного эксперимента $q=3$

Общее число опытов при реализации центральных композиционных планов второго порядка определяется выражением (3.6)

$$N_{ЦКП} = N_{яд} + N_{\alpha} + n_0 \quad (3.6)$$

где $N_{яд}$ – число опытов в ядре плана;

N_{α} – число звездных точек;

n_0 – число опытов в центре плана.

При $q < 5$ ядром плана служит матрица двухуровневого полнофакторного эксперимента с числом опытов $N_{яд} = 2^q$. При $q \geq 5$ в качестве ядра плана рекомендуется использовать матрицы соответствующих регулярных дробных реплик с числом опытов $N_{яд} = 2^{q-m}$ ($m = 1, 2, 3, \dots$). Число звездных точек всегда равно $N_{\alpha} = 2 \cdot q$, а число опытов в центре эксперимента в большинстве случаев принимают равным единице ($n_0 = 1$). С учетом вышеизложенного рассчитаны численные значения $N_{ЦКП}$, представленные в двух последних строках табл. 3.1. Данные этой таблицы убедительно доказывают преимущество метода ЦКП по сравнению с методами трехуровневого полно- и дробнофакторного планирования второго порядка. Так, например, при числе факторов $q = 5$ использование центрального композиционного плана, построенного на основе ядра ПФЭ- 2^{q-1} , дает возможность определения 21 неизвестного коэффициента регрессии по результатам 27 опытов, в то время как по плану ПФЭ- 3^q для этого потребовалось

бы 243 опыта, а по плану $RDR-3^{q-1}$ – 81 опыт. Основой стратегии композиционного планирования является принцип последовательной достройки планов эксперимента с их трансформацией «от простого – к сложному». Например, при двух факторах сначала в соответствии с матрицей $ПФЭ-2^2$ ставятся опыты 1-4, показанные точками на рис. 4.1 а. Эти опыты составляют ядро плана. Данные, полученные в результате реализации этих опытов, позволяют аппроксимировать поверхность отклика на данном локальном участке линейной моделью. Если последняя окажется неадекватной, добавляют опыты в звездных точках 5-8 и в центре эксперимента 9. При этом число уровней варьирования каждого фактора увеличивается с двух до пяти ($-\alpha$; -1 ; 0 ; $+1$; $+\alpha$). По результатам 9 опытов могут быть оценены коэффициенты регрессии полиномиальной модели второго порядка. Общий вид нормализованной матрицы центрального композиционного планирования двухфакторного эксперимента показан в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица центрального композиционного плана второго порядка для двухфакторного эксперимента (общий вид)

Части ЦКП	№ опыта, i	X_0^* ($u=1$)	X_1^* ($u=2$)	X_2^* ($u=3$)	$X_1^* \cdot X_2^*$ ($u=4$)	$(X_1^*)^2$ ($u=5$)	$(X_2^*)^2$ ($u=6$)
Ядро плана	1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
	2	+1	-1	+1	-1	+1	+1
	3	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	4	+1	+1	-1	-1	+1	+1
Звездные точки	5	+1	$+\alpha$	0	0	α^2	0
	6	+1	$-\alpha$	0	0	α^2	0
	7	+1	0	$+\alpha$	0	0	α^2
	8	+1	0	$-\alpha$	0	0	α^2
Центр	9	+1	0	0	0	0	0
Суммы	-	9	0	0	0	$4+2\alpha^2$	$4+2\alpha^2$

При трех факторах сначала можно поставить опыты дробной полуреплики $RDR-2^{3-1}$, показанные точками 1-4 на рис. 3.1 б. Затем, если линейная модель окажется неадекватной, можно дополнить план эксперимента опытами 5-8, доведя его до $ПФЭ-2^3$. Если и в этом случае адекватность линейной модели не

подтверждается, следует добавить звездные точки 9-14 и поставить опыт 15 в центре области эксперимента.

Таким образом, стратегия композиционного планирования реализуется путем последовательного усложнения модели. Эта стратегия позволяет на любом этапе исследования ограничиваться моделями минимальной сложности и не ставить лишние опыты после подтверждения адекватности полученного математического описания.

3.3. Ортогональное центральное композиционное планирование

Для анализа и обработки данных используется метод ортогонального центрального композиционного планирования второго порядка, в котором в качестве определяющего критерия оптимальности используется ортогональность столбцов нормализованной матрицы планирования, позволяющая получать независимые друг от друга оценки коэффициентов регрессии. Ортогональность всех u -х вектор-столбцов нормализованной матрицы планирования второго порядка может быть проверена по выполнению условия (3.7)

$$\sum_{i=1}^N (X_{u,i}^* \cdot X_{u',i}^*) = 0 \text{ при } u \neq u' \text{ от } 1 \text{ до } L_2 \quad (3.7)$$

где L_2 – число вектор-столбцов в матрице планирования, численно равное количеству неизвестных коэффициентов математической модели;

u и u' – номера проверяемых вектор- столбцов;

I и N – номер и общее количество опытов.

Анализируя возможность выполнения этого условия на примере матрицы, представленной в табл. 3.2, следует заметить, что в 257 рассматриваемом случае условие ортогональности принципиально не может выполняться для вектор-столбцов с квадратичными членами, так как

$$\sum_{i=1}^N [X_{0,i}^* \cdot (X_{u',i}^*)^2] = 4 + 2\alpha^2 \neq 0 \quad (3.8)$$

$$\sum_{i=1}^N [(X_{u,i}^*)^2 \cdot (X_{u',i}^*)^2] = 4 \neq 0 \quad (3.9)$$

Однако, как показывают расчеты, если выполнить определенные математические преобразования, связанные с заменой переменных в

квадратичных вектор-столбцах, и специальным образом рассчитать величину звездного плеча α , то можно добиться полной ортогональности матрицы центрального композиционного плана второго порядка. Математические преобразования, необходимые для выполнения условия ортогональности в данном случае заключаются в том, что вместо квадратичных членов в соответствующие столбцы матрицы композиционного плана подставляются новые условные переменные, предварительно пересчитанные следующим образом:

$$(X_{u,i}^*)_{усл}^2 = (X_{u,i}^*)^2 - (X_u^*)_{ср}^2 \quad (3.10)$$

где $(X_u^*)_{ср}^2$ - среднее арифметическое значение соответствующего u -го квадратичного члена по всему вектор-столбцу, рассчитываемое как

$$(X_u^*)_{ср}^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (X_{u,i}^*)^2 = \frac{1}{N} \cdot (N_{яд} + 2\alpha^2) \quad (3.11)$$

Так, например, при двухфакторном эксперименте средние значения квадратичных членов по соответствующим вектор-столбцам табл. 3.2, согласно выражению (4.9), составят

$$(X_1^*)_{ср}^2 = (X_2^*)_{ср}^2 = \frac{1}{9} \cdot (4 + 2\alpha^2) \quad (3.12)$$

Несложно проверить, что после замены всех квадратичных членов условными переменными, рассчитанными по формуле (3.10), начинает выполняться условие о равенстве нулю выражения (3.8), то есть достигается ортогональность вектор-столбцов $X_{0,i}^*$ и $(X_{u,i}^*)_{усл}^2$ матрицы планирования.

После выполненной замены переменных необходимо добиться взаимной ортогональности вновь полученных квадратичных вектор-столбцов, то есть выполнения условия

$$\sum_{i=1}^N [(X_{u,i}^*)_{усл}^2 \cdot (X_{u',i}^*)_{усл}^2] = 0 \quad (3.13)$$

Исходя из этого условия получено уравнение для определения значений звездного плеча α , которое имеет следующий вид:

$$4\alpha^4 + 4N_{яд} \cdot \alpha^2 - N_{яд}(N_{\alpha} + n_0) \quad (3.14)$$

Решением уравнения (3.14) является следующая расчетная формула, позволяющая находить величину звездного плеча для каждого конкретного частного случая:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} [(N_{яд} \cdot N)^{0.5} - N_{яд}]} \quad (3.15)$$

где $N_{яд}$ и N – число опытов в ядре плана и общее количество опытов ортогональной матрицы планирования второго порядка ($N = NЦКП$), определяемое выражением (3.6).

Основные параметры, необходимые для построения ортогональных центральных композиционных планов второго порядка, при различном числе факторов представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Основные параметры ОЦКП

Параметры	Значение параметров при числе факторов q , равном			
	2	3	4	5
Структура ядра	ПФЭ-2 ²	ПФЭ-2 ³	ПФЭ-2 ⁴	РДР-2 ⁵⁻¹
Число опытов в ядре, $N_{яд}$	4	8	16	16
Число звездных точек N_{α}	4	6	8	10
Число опытов в центре, n_0	1	1	1	1
Общее число опытов, N	9	15	25	27
Величина звездного плеча, α	1,000	1,215	1,414	1,547
Средние значения $(X_u^*)_{cp}^2$ для расчета условных переменных	0,667	0,730	0,800	0,790

Используя данные табл. 3.3, можно трансформировать любую нормализованную матрицу планирования второго порядка, приведя ее к ортогональному виду. Так, например, матрица двухфакторного эксперимента, представленная в табл. 3.2, после процедуры ортогонализации приобретет следующий вид:

Таблица 3.4 – Матрица ОЦКП двухфакторного эксперимента второго порядка

Части ЦКП	№ опыта, i	X_0^*	X_1^*	X_2^*	$X_1^* X_2^*$	$(X_1^*)^2_{усл}$	$(X_2^*)^2_{усл}$	Отклик
Ядро плана	1	1	1	1	1	0,333	0,333	
	2	1	-1	1	-1	0,333	0,333	
	3	1	1	-1	-1	0,333	0,333	
	4	1	-1	-1	1	0,333	0,333	
Звездные точки	5	1	1	0	0	0,333	-0,667	
	6	1	-1	0	0	0,333	-0,667	
	7	1	0	1	0	-0,667	0,333	
	8	1	0	-1	0	-0,667	0,333	
Центр	9	1	0	0	0	-0,667	-0,667	
Суммы	-	9	0	0	0	0	0	

Реализация плана эксперимента, установленного матрицей ОЦКП, позволяет построить следующую условную математическую модель, вид которой несколько отличается от обычного вида нормализованной модели (3.3) из-за использования преобразованных квадратичных членов:

$$\hat{y} = B_0^{усл} + \sum_{u=1}^q (K_u^* \cdot X_u^*) + \sum_{\substack{u=1; c=1; \\ u \neq c}}^C (K_{uc}^* \cdot X_u^* \cdot X_c^*) + \sum_{u=z}^q \left\{ K_{uu}^* \cdot \left[(X_u^*)^2 - (X_u^*)_{cp}^2 \right] \right\} \quad (3.16)$$

В силу ортогональности плана все коэффициенты регрессии условной модели (3.16) определяются независимо друг от друга по формулам:

$$\left. \begin{aligned} B_0^{усл} &= \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{0,i}^*)}{N}; \quad K_u^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{u,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{u,i}^*)^2}; \\ K_{uc}^* &= \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{u,i}^* \cdot X_{c,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{u,i}^* \cdot X_{c,i}^*)^2}; \quad K_{uu}^* = \frac{\sum_{i=1}^N [y \cdot (X_{u,i}^*)^2]_{усл_i}}{\sum_{i=1}^N [(X_{u,i}^*)^2]_{усл}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Для перехода от условий математической модели к обычному виду нормализованного уравнения регрессии второго порядка необходимо лишь преобразовать свободный член по формуле

$$B_0^* = B_{ycl}^* - \sum_{u=1}^q [K_{uu}^* \cdot (X_u^*)_{cp}^2] \quad (3.18)$$

Так, например, в случае планирования двухфакторного эксперимента формула (3.18) примет следующий частный вид:

$$B_0^* = B_{ycl}^* - 0,667 \cdot (K_{11}^* + K_{22}^*) \quad (3.19)$$

После преобразования свободного члена математическая модель функции отклика приобретает обычный вид нормализованного уравнения регрессии второго порядка:

$$\hat{y} = B_0^* + \sum_{u=1}^q (K_u^* \cdot X_u^*) + \sum_{\substack{u=1; c=1: \\ u \neq c}}^C (K_{uc}^* \cdot X_u^* \cdot X_c^*) + \sum_{u=z}^q [K_{uu}^* \cdot (X_u^*)^2] \quad (3.20)$$

Воспроизводимость эксперимента при одинаковом числе параллельных опытов $n = const$ оценивается традиционным методом: сначала рассчитываются построчные дисперсии отклика $S_{(y),i}^2$, затем по критерию Кохрена проверяется их однородность, после подтверждения которой вычисляются дисперсия воспроизводимости $S_{(y)}^2$ и дисперсия среднего $S_{(\bar{y})}^2$

$$S_{(y),i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{i,j})}{n-1}; \quad S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{(y),i}^2}{N}; \quad S_{(\bar{y})}^2 = \frac{S_{(y)}^2}{n} \quad (3.21)$$

После расчета численного значения $S_{(\bar{y})}^2$ определяются дисперсии коэффициентов нормализованного уравнения регрессии $S_{(K_u^*)}^2$. При этом ортогональность плана позволяет легко получать оценки этих дисперсий по следующим простым формулам:

$$\left. \begin{aligned} S_{(B_0^*)}^2 &= \frac{S_{(\bar{y})}^2}{N}; \quad S_{(K_u^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{u,i}^*)^2}; \\ S_{(K_{uc}^*)}^2 &= \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{u,i}^* \cdot X_{c,i}^*)^2}; \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

Анализируя эти формулы, можно заметить, что из-за разнознаменателя дисперсии коэффициентов регрессии при ортогональном планировании второго порядка различны для каждой группы коэффициентов.

Дисперсия преобразованного свободного члена B_0^* , рассчитываемого по выражению (3.19), находится как дисперсия суммы нескольких случайных величин, умноженных на соответствующие константы, согласно правилам математических операций с дисперсиями:

$$S_{(B_0^*)}^2 = S_{(B_0^{кр})}^2 + \sum_{u=1}^q \left\{ \left[(\bar{X}_u^*)_{cp} \right]^2 \cdot S_{(K_{uu}^*)}^2 \right\} \quad (3.23)$$

Например, в случае преобразования свободного члена по формуле (3.19), соответствующей условиям двухфакторного эксперимента, выражение (3.23) примет следующий частный вид:

$$S_{(B_0^*)}^2 = S_{(B_0^{кр})}^2 + 0,667^2 [S_{(K_{11})}^2 + S_{(K_{12})}^2] \quad (3.24)$$

После расчета указанных дисперсий реализуется стандартная процедура оценки значимости коэффициентов полученного нормализованного уравнения регрессии, которая основана на сравнении найденных с использованием t -критерия Стьюдента доверительных интервалов с абсолютной величиной каждого коэффициента.

Проверка адекватности нормализованных математических моделей второго порядка, полученных на основе ОЦКП, производится с использованием F -критерия Фишера так же, как и при линейном планировании.

После подтверждения адекватности модели может быть осуществлен переход от нормализованных переменных к натуральным. Для этого полученное нормализованное уравнение регрессии переписывается в следующем виде:

$$\hat{y} = B_0^* + \sum_{u=1}^q \left(K_u^* \cdot \frac{x_u - x_{u,0}}{\Delta x_u} \right) + \sum_{\substack{u=1; c=1; \\ u \neq c}}^C \left(K_{uc}^* \cdot \frac{x_u - x_{u,0}}{\Delta x_u} \cdot \frac{x_c - x_{c,0}}{\Delta x_c} \right) + \sum_{u=1}^q \left[K_{uu}^* \cdot \left(\frac{x_u - x_{u,0}}{\Delta x_u} \right)^2 \right] \quad (3.25)$$

где x_u и x_c – натуральные переменные (текущие значения соответствующих факторов в пределах области эксперимента в натуральном исчислении);

$x_{u,0}$ и $x_{c,0}$ – координаты центра эксперимента по каждому фактору в натуральном исчислении;

Δx_u – интервалы варьирования каждого фактора.

В результате ряда элементарных математических преобразований, выполненных после подстановки в уравнение (3.25) известных численных значений $x_{u,0}$, $x_{c,0}$ и Δx_u , можно получить стандартный вид полиномиальной математической модели второго порядка (3.3) в натуральных переменных.

Процедура натурализации математической модели обычно производится в том случае, когда главной целью эксперимента является получение математического описания поверхности отклика.

Если же целью эксперимента является непосредственный поиск экстремума целевой функции, то процедуру натурализации математической модели можно опустить. В этом случае гораздо проще, проанализировав на экстремум нормализованную модель, сразу же определить нормализованные координаты экстремума, которые затем очень просто пересчитать в натуральные.

На основе изложенной теории в программном комплексе Microsoft Excel составлен ряд таблиц, которые позволяют рассчитывать коэффициенты уравнения регрессии на основании заданных факторов и полученных откликов.

3.4. Методика проведения эксперимента

Эксперимент осуществляется следующим образом (рис. 3.2). В напорном резервуаре (8) компрессором (1) создается избыточное давление воздуха. К установке принят поршневой компрессор К12 производительностью по нагнетанию $0,6\text{ м}^3/\text{мин}$ и с максимальным рабочим давлением 10 атм. Величина избыточного давления контролируется с помощью манометра (5) и датчика давления (7). Изменение величины избыточного давления в напорном резервуаре (8) осуществляется за счет периодического включения компрессора (1), а также сбрасыванием воздуха через предохранительно-сбросной клапан (6). Резервуар (16) заполняется модельной жидкостью, в качестве которой используется водопроводная вода. При этом в ходе эксперимента изменялась температура воды за счет смешивания воды из систем ХВС и ГВС, контроль температуры осуществлялся с помощью датчика температуры (17). При включении насоса (11) в напорном резервуаре (8) через гидравлическую форсунку (9) начинает

разбрызгиваться жидкость. В качестве насоса используется роторно-пластинчатый насос НГ 1,0/2,5 с номинальной подачей $1 \text{ м}^3/\text{час}$ и номинальным напором 25 бар. Для предотвращения поступления сжатого воздуха из напорного резервуара (8) в резервуар (16) и поступления распыливаемой жидкости из напорного резервуара (8) в ресивер компрессора (1) использовались обратные клапаны (4) и (12). При проведении эксперимента необходимо с помощью указателя уровня (10) следить за уровнем воды в резервуаре. Поддержание воды на одном уровне достигается с помощью регулирующего вентиля (13).

Жидкость после распыливания отводится из нижней части напорного резервуара (8) по трубопроводу В2 и попадает во флотационную емкость (16), находящуюся под атмосферным давлением.

Данные с датчиков расхода (21) и (22), датчиков давления (7) и (19), датчиков температуры (17) и (20) поступают на тепловычислитель (18).

По окончанию эксперимента вода из системы сливается в канализацию через шаровой кран (12).

В ходе проведения эксперимента изменялось избыточное давление в напорном резервуаре от 0 до 6 бар, а также температура распыливаемой жидкости.

Эксперимент проведен трижды для каждой форсунки: при температурах распыливаемой жидкости 15, 30 и 45 градусов. При этом в ходе проведения каждого эксперимента изменялось давление в напорном резервуаре от 0 до 6 бар. Скорости истечения жидкости из форсунки составляют: $22,6 \text{ м/с}$ для форсунки WL3-60 и 35 м/с для форсунки TF8.

При изменении вышеперечисленных параметров велась фотофиксация угла распыла жидкости через смотровые окна. При обработке данных фотоматериалы, полученные в результате эксперимента, загружались в систему автоматизированного проектирования и черчения AutoCAD, в которой измерялась величина корневого угла факела.

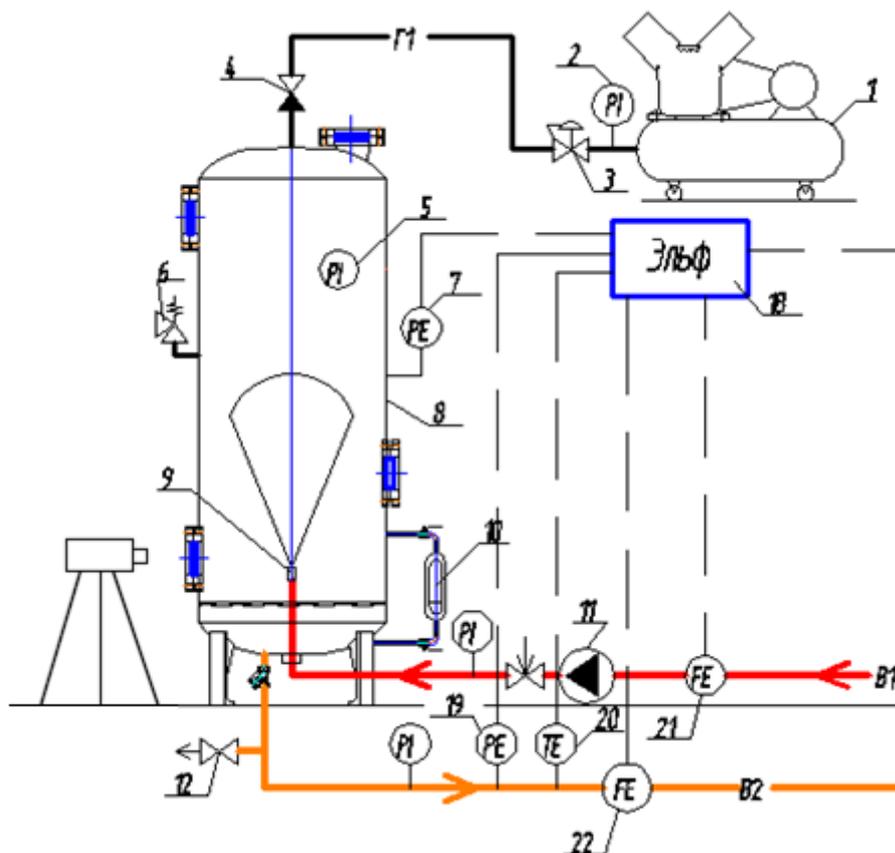


Рисунок 3.2 – Схема экспериментальной установки

Эксперимент проводился при использовании 2 видов форсунок: центробежно-струйной WL3-60 (рис.3.3) и ударно-струйной с каскадным отражателем TF8 (рис.3.4).



Рисунок 3.3 – Форсунка WL3-60



Рисунок 3.4 – Форсунка TF8

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Экспериментальная установка

3.5. Обработка эксперимента с использованием форсунки WL3-60

На рис. 3.6 и 3.7 представлены фотографии, сделанные при проведении эксперимента с использованием центробежно-струйной форсунки WL3-60.

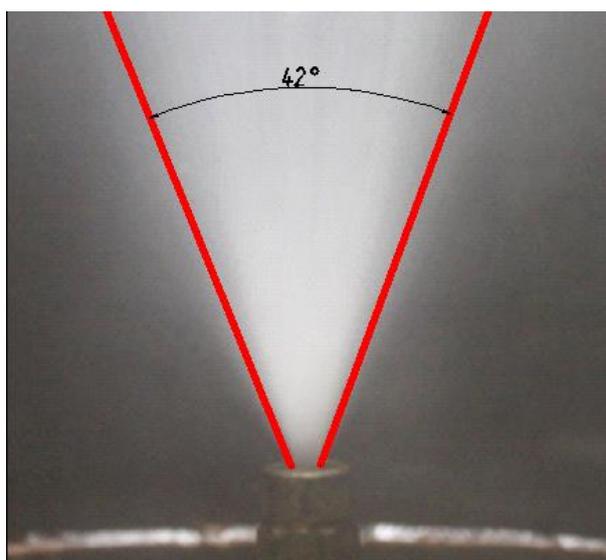


Рисунок 3.6 – Распыливание жидкости при давлении 0 бар

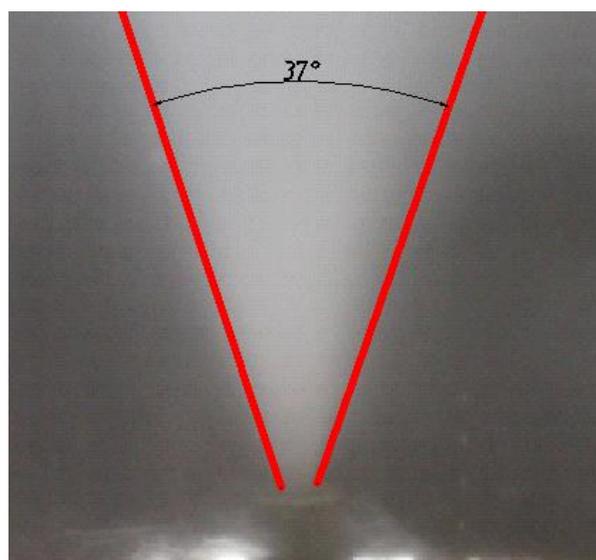


Рисунок 3.7 – Распыливание жидкости при давлении 5 бар

Таблица 3.5 – Рабочая матрица планирования эксперимента

Части ЦКП	№ опыта, i	Уровни факторов				Результаты			Дисперсия $S_{(y), i}^2$
		натуральные		нормализованные		параллельных наблюдений		средние	
		x_1	x_2	X_1	X_2	y_i^1	y_i^2	y_i	
Ядро плана	1	5	45	1	1	37	38	37,5	0,50
	2	1	45	-1	1	41	39	40	2,00
	3	5	15	1	-1	36	34	35	2,00
	4	1	15	-1	-1	41	43	42	2,00
Звездные точки	5	5	30	1	0	33	33	33	0,00
	6	1	30	-1	0	40	43	41,5	4,50
	7	3	45	0	1	39	39	39	0,00
	8	3	15	0	-1	34	37	35,5	4,50
Центр	9	3	30	0	0	38	38	38	0,00

$$\sum_{i=1}^{N=9} S_{(y),i}^2 = 15,5$$

Расчет общей дисперсии воспроизводимости $S_{(y)}^2$ и дисперсии среднего $S_{(\bar{y})}^2$ в пределах всего эксперимента

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{(y),i}^2}{N} = \frac{15,5}{9} = 1,72 \quad S_{(\bar{y})}^2 = \frac{S_{(y)}^2}{n} = \frac{1,72}{2} = 0,86$$

Таблица 3.6 – Матрица ОЦКП двухфакторного эксперимента второго порядка

Части ЦКП	№ опыта, i	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	$(X_1)^2_{\text{усл}}$	$(X_2)^2_{\text{усл}}$	Отклик
Ядро плана	1	1	1	1	1	0,333	0,333	37,5
	2	1	-1	1	-1	0,333	0,333	40
	3	1	1	-1	-1	0,333	0,333	35
	4	1	-1	-1	1	0,333	0,333	42
Звездные точки	5	1	1	0	0	0,333	-0,667	33
	6	1	-1	0	0	0,333	-0,667	41,5
	7	1	0	1	0	-0,667	0,333	39
	8	1	0	-1	0	-0,667	0,333	35,5
Центр	9	1	0	0	0	-0,667	-0,667	38
$\sum_{i=1}^N (X_u^*)^2$		9	6	6	4	2	2	

Таблица 3.7 – Вспомогательная матрица для расчета коэффициентов

№ опыта, i	Вспомогательные комплексы					
	$y \cdot X_0$	$y X_1$	$y X_2$	$y X_1 X_2$	$y (X_1)^2_{\text{усл}}$	$y (X_2)^2_{\text{усл}}$
1	37,5	37,5	37,5	37,5	12,49	12,49
2	40	-40	40	-40	13,32	13,32
3	35	35	-35	-35	11,66	11,66
4	42	-42	-42	42	13,99	13,99
5	33	33	0	0	10,99	-22,01
6	41,5	-41,5	0	0	13,82	-27,68
7	39	0	39	0	-26,01	12,99
8	35,5	0	-35,5	0	-23,68	11,82
9	38	0	0	0	-25,35	-25,35
	341,5	-18	4	4,5	1,22	1,22

На основании данных таблиц 3.6 и 3.7 по формулам (3.17) рассчитываются коэффициенты регрессии условной нормализованной математической модели:

$$B_0^{\text{усл}} = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{0,i}^*)}{N} = \frac{341,5}{9} = 37,94;$$

$$K_1^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{1,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^*)^2} = \frac{-18}{6} = -3; K_2^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{2,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{2,i}^*)^2} = \frac{4}{6} = 0,67;$$

$$K_{12}^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{1,i}^* \cdot X_{2,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^* \cdot X_{2,i}^*)^2} = \frac{4,5}{4} = 1,13;$$

$$K_{11}^* = \frac{\sum_{i=1}^N [y \cdot (X_{1,i}^*)^2]_{\text{усл}_i}}{\sum_{i=1}^N [(X_{1,i}^*)^2]_{\text{усл}_i}} = \frac{1,22}{2} = 0,61; K_{22}^* = \frac{\sum_{i=1}^N [y \cdot (X_{2,i}^*)^2]_{\text{усл}_i}}{\sum_{i=1}^N [(X_{2,i}^*)^2]_{\text{усл}_i}} = \frac{1,22}{2} = 0,61.$$

По формулам (3.22) рассчитываются дисперсии полученных коэффициентов регрессии:

$$S_{(B_0^{\text{усл}})}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{N} = \frac{0,866}{9} = 0,096;$$

$$S_{(K_1^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^*)^2} = \frac{0,86}{6} = 0,144; S_{(K_2^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{2,i}^*)^2} = \frac{0,86}{6} = 0,144;$$

$$S_{(K_{12}^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^* \cdot X_{2,i}^*)^2} = \frac{0,86}{4} = 0,215;$$

$$S_{(K_{11}^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N [(X_{1,i}^*)_{\text{усл}}]^2} = \frac{0,86}{2} = 0,431; S_{(K_{22}^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N [(X_{2,i}^*)_{\text{усл}}]^2} = \frac{0,86}{2} = 0,431.$$

Переход от условной математической модели кобычному виду нормализованного уравнения регрессии второго порядка. Для этого по формуле (3.18) преобразуется свободный член.

$$B_0^* = B_{\text{усл}}^* - 0,667 \cdot (K_{11}^* + K_{22}^*) = 37,94 - 0,667 \cdot (0,61 + 0,61) = 37,13$$

По формуле (3.23) рассчитывается дисперсия преобразованного свободного члена.

$$S_{(B_0^*)}^2 = S_{(B_{\text{усл}}^*)}^2 + 0,667^2 \cdot [S_{(K_{11}^*)}^2 + S_{(K_{22}^*)}^2] = 0,096 + 0,445 \cdot (0,431 + 0,431) = 0,479$$

Оценка значимости коэффициентов нормализованного уравнения регрессии. Для этого рассчитываются доверительные интервалы по каждой группе коэффициентов с использованием табличного значения критерия Стьюдента, $t_\alpha = 2,262$ при уровне доверительной вероятности $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $m = N(n-1) = 9$

$$\Delta B_0^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(B_0^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,479} = 1,57$$

$$\Delta K_1^* = \Delta K_2^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(K_i^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,144} = 0,86$$

$$\Delta K_{12}^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(K_{12}^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,215} = 1,05$$

$$\Delta K_{11}^* = \Delta K_{22}^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(K_{ii}^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,431} = 1,48$$

Сравнивая по модулю полученные значения коэффициентов регрессии нормализованной математической модели с соответствующими доверительными интервалами, убеждаемся в том, что значимыми являются коэффициенты B_0^* , K_1^* и K_{12}^* , т. е. $L=3$.

Полученная по результатам эксперимента нормализованная математическая модель функции отклика представляется в виде следующего уравнения регрессии:

$$\hat{y} = 37,13 - 3 \cdot X_1^* + 1,13 \cdot X_1^* \cdot X_2^* \quad (3.26)$$

Перевод нормализованной математической модели к натуральному виду, осуществляется по формуле (3.25)

$$\hat{y} = 37,13 - 3 \cdot \left(\frac{x_1 - 3}{2} \right) + 1,13 \cdot \left(\frac{x_1 - 3}{2} \right) \cdot \left(\frac{x_2 - 30}{15} \right)$$

$$y = 45,02 - 2,63x_1 - 0,113x_2 - 0,038x_1x_2 \quad (3.27)$$

Проверка адекватности математической модели. Для этого в полученное уравнение регрессии подставляются значения нормализованных уровней, соответствующие условиям проведения всех опытов, и определяются расчетные значения откликов \hat{y}_i , которые сопоставляются с осредненными экспериментальными данными \bar{y}_i , полученными при тех же условиях. Результаты расчета показаны в табл. 3.8.

Таблица 3.8 – Данные для расчета дисперсии адекватности

№ опыта, i	Нормализованные уровни		Значения откликов		Расхождения	
			Экспериментальные	расчетные	$y_{э}-y_p$	$(y_{э}-y_p)^2$
	X_1	X_2	$y_i^э$	y_i^p		
1	1	1	37,5	35,26	2,24	5,035
2	-1	1	40	39,01	0,99	0,988
3	1	-1	35	33,01	1,99	3,976
4	-1	-1	42	41,26	0,74	0,553
5	1	0	33	34,13	-1,13	1,279
6	-1	0	41,5	40,13	1,37	1,874
7	0	1	39	37,13	1,87	3,493
8	0	-1	35,5	37,13	-1,63	2,660
9	0	0	38	37,13	0,87	0,755
					Σ	20,614

По данным этой таблицы рассчитывается дисперсия адекватности математической модели

$$S_{a\delta}^2 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2}{N - L} = \frac{2 \cdot 20,614}{9 - 3} = 6,871$$

где N и n – число опытов в матрице планирования и число параллельных наблюдений;

L – число значимых коэффициентов регрессии

Расчет фактического значения F -критерия Фишера и сравнение с табличным

$$F = \frac{S_{(y)}^2}{S_{a\delta}^2} = \frac{1,72}{6,871} = 0,251$$

$$F_{маб} = 8,81 \text{ при } m_1=9, m_2=3, \alpha=0,05$$

Так как фактическое значение F -критерия меньше табличного, полученная нормализованная аппроксимирующая зависимость второго порядка (3.27) признается адекватной с доверительной вероятностью 95%.

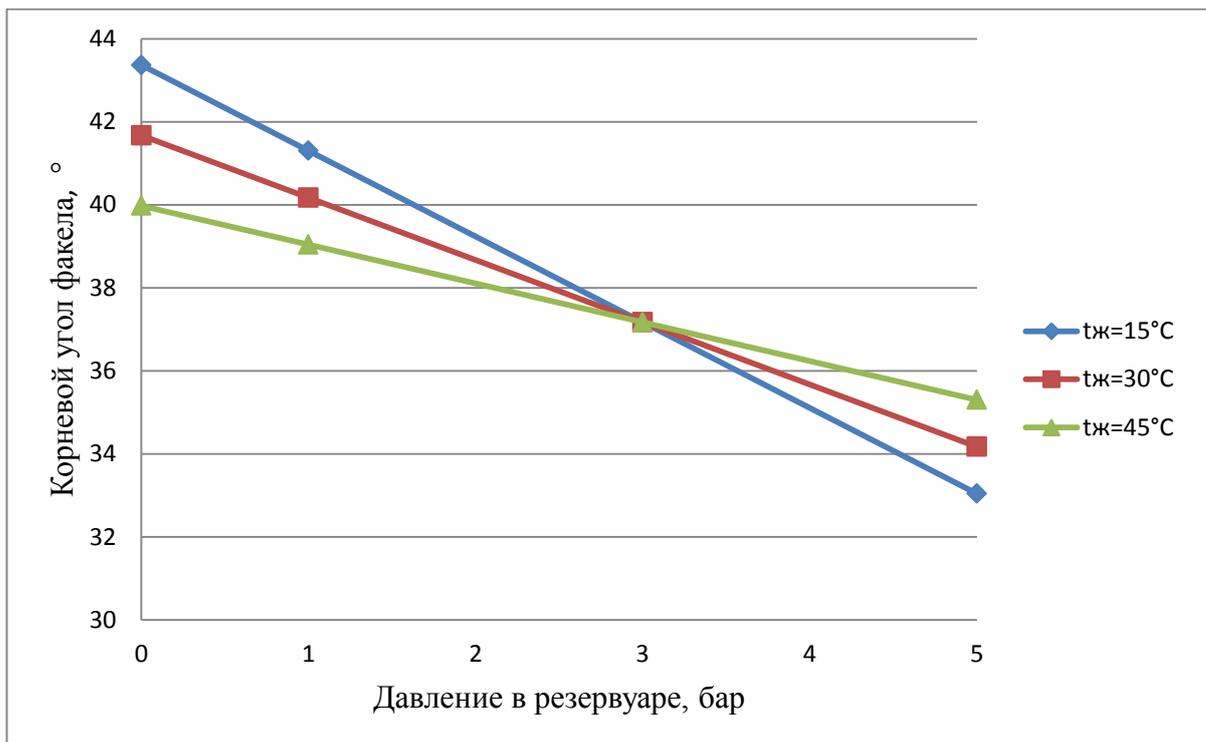


Рисунок 3.8 – Зависимость угла распыла центробежно-струйной форсунки от избыточного давления в напорном резервуаре и температуры распыливаемой жидкости при скорости истечения жидкости из сопла 22,6 м/с

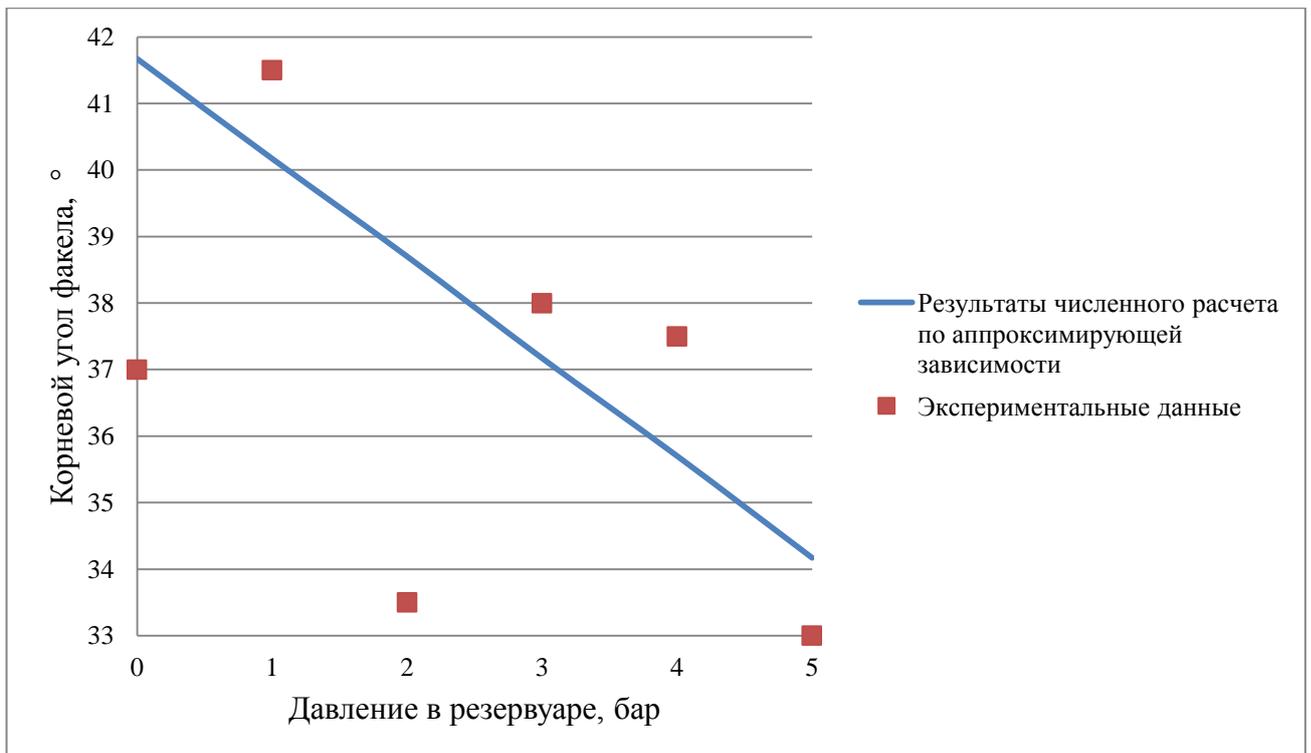


Рисунок 3.9 – Зависимость угла распыла жидкости с температурой $t_{жк}=30^{\circ}$ от давления в напорном резервуаре

Результаты численного расчета по натурализованной аппроксимирующей зависимости (3.27) представлены на рис. 3.8. По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Корневой угол факела распыла жидкости при атмосферном давлении по паспортным данным форсунки WL3-60 составляет 60° , при проведении эксперимента корневой угол факела распыла жидкости составил 40° . Это может быть связано с различными асимметриями распылителя, связанными с его конструкцией или качеством его изготовления.

2. Корневой угол факела зависит от избыточного давления воздуха в напорном резервуаре и линейно уменьшается с увеличением давления.

3. При изменении температуры жидкости корневой угол факела изменяется незначительно.

4. На основе визуального наблюдения за процессом распыла можно сделать вывод, что с увеличением давления уменьшается средний диаметр капли, при одновременном увеличении времени витания.

3.6. Обработка эксперимента с использованием форсунки TF8

На рис. 3.10 и 3.11 представлены фотографии, сделанные при проведении эксперимента с использованием ударно-струйной форсунки TF8.

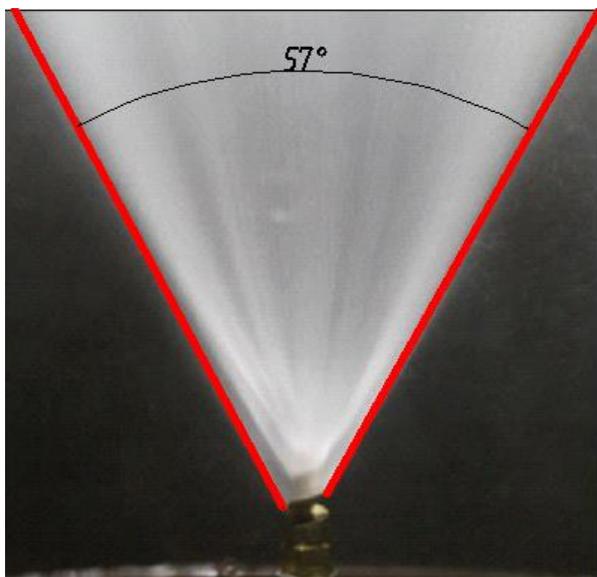


Рисунок 3.10 – Распыливание жидкости при давлении 0 бар

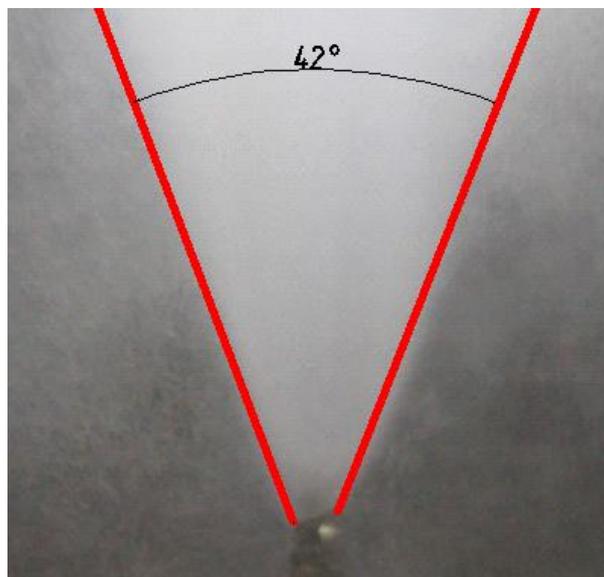


Рисунок 3.11 – Распыливание жидкости при давлении 5 бар

Таблица 3.9 – Рабочая матрица планирования эксперимента

Части ЦКП	№ опыта, i	Уровни факторов				Результаты			Дисперсия $S_{(y), i}^2$
		натуральные		нормализованные		параллельных наблюдений		средние	
		x_1	x_2	X_1^*	X_2^*	y_i^1	y_i^2	y_i	
Ядро плана	1	5	45	1	1	40	41	40,5	0,50
	2	1	45	-1	1	56	55	55,5	0,50
	3	5	15	1	-1	39	40	39,5	0,50
	4	1	15	-1	-1	53	52	52,5	0,50
Звездные точки	5	5	30	1	0	42	42	42	0,00
	6	1	30	-1	0	53	56	54,5	4,50
	7	3	45	0	1	44	44	44	0,00
	8	3	15	0	-1	44	48	46	8,00
Центр	9	3	30	0	0	45	47	46	2,00
$\sum_{i=1}^{N=9} S_{(y), i}^2 = 16,5$									

Расчет общей дисперсии воспроизводимости $S_{(y)}^2$ и дисперсия среднего $S_{(\bar{y})}^2$ в пределах всего эксперимента

$$S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_{(y),i}^2}{N} = \frac{16,5}{9} = 1,83$$

$$S_{(\bar{y})}^2 = \frac{S_{(y)}^2}{n} = \frac{1,83}{2} = 0,92$$

Таблица 3.10 – Матрица ОЦКП двухфакторного эксперимента второго порядка

Части ЦКП	№ опыта, i	X_0^*	X_1^*	X_2^*	$X_1^* X_2^*$	$(X_1^*)^2_{усл}$	$(X_2^*)^2_{усл}$	Отклик
Ядро плана	1	1	1	1	1	0,333	0,333	40,5
	2	1	-1	1	-1	0,333	0,333	55,5
	3	1	1	-1	-1	0,333	0,333	39,5
	4	1	-1	-1	1	0,333	0,333	52,5
Звездные точки	5	1	1	0	0	0,333	-0,667	42
	6	1	-1	0	0	0,333	-0,667	54,5
	7	1	0	1	0	-0,667	0,333	44
	8	1	0	-1	0	-0,667	0,333	46
Центр	9	1	0	0	0	-0,667	-0,667	46
$\sum_{i=1}^N (X_u^*)^2$		9	6	6	4	2	2	

Таблица 3.11 – Вспомогательная матрица для расчета коэффициентов

№ опыта, i	Вспомогательные комплексы					
	$y \cdot X_0^*$	$y X_1^*$	$y X_2^*$	$y X_1^* X_2^*$	$y (X_1^*)^2_{усл}$	$y (X_2^*)^2_{усл}$
1	40,5	40,5	40,5	40,5	13,49	13,49
2	55,5	-55,5	55,5	-55,5	18,48	18,48
3	39,5	39,5	-39,5	-39,5	13,15	13,15
4	52,5	-52,5	-52,5	52,5	17,48	17,48
5	42	42	0	0	13,99	-28,01
6	54,5	-54,5	0	0	18,15	-36,35
7	44	0	44	0	-29,35	14,65
8	46	0	-46	0	-30,68	15,32
9	46	0	0	0	-30,68	-30,68
Суммы	420,5	-40,5	2	-2	4,03	-2,47

На основании данных таблиц 3.10 и 3.11 по формулам (3.17) рассчитываются коэффициенты регрессии условной нормализованной математической модели:

$$B_0^{ycl} = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{0,i}^*)}{N} = \frac{420,5}{9} = 46,72;$$

$$K_1^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{1,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^*)^2} = \frac{-40,5}{6} = -6,75; K_2^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{2,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{2,i}^*)^2} = \frac{2}{6} = 0,33;$$

$$K_{12}^* = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i \cdot X_{1,i}^* \cdot X_{2,i}^*)}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^* \cdot X_{2,i}^*)^2} = \frac{-2}{4} = -0,5;$$

$$K_{11}^* = \frac{\sum_{i=1}^N [y \cdot (X_{1,i}^*)_{ycl}^2]}{\sum_{i=1}^N [(X_{1,i}^*)_{ycl}^2]^2} = \frac{4,03}{2} = 2,01; K_{22}^* = \frac{\sum_{i=1}^N [y \cdot (X_{2,i}^*)_{ycl}^2]}{\sum_{i=1}^N [(X_{2,i}^*)_{ycl}^2]^2} = \frac{-2,47}{2} = -1,24.$$

По формулам (3.22) рассчитываются дисперсии полученных коэффициентов регрессии:

$$S_{(B_0^{ycl})}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{N} = \frac{0,92}{9} = 0,102;$$

$$S_{(K_1^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^*)^2} = \frac{0,92}{6} = 0,153; S_{(K_2^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{2,i}^*)^2} = \frac{0,92}{6} = 0,153;$$

$$S_{(K_{12}^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N (X_{1,i}^* \cdot X_{2,i}^*)^2} = \frac{0,92}{4} = 0,229;$$

$$S_{(K_{11}^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N [(X_{1,i}^*)_{ycl}^2]^2} = \frac{0,92}{2} = 0,458; S_{(K_{22}^*)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{\sum_{i=1}^N [(X_{2,i}^*)_{ycl}^2]^2} = \frac{0,92}{2} = 0,458.$$

Переход от условной математической модели кобычному виду нормализованного уравнения регрессии второго порядка. Для этого по формуле (3.18) преобразуется свободный член.

$$B_0^* = B_{ycl}^* - 0,667 \cdot (K_{11}^* + K_{22}^*) = 46,72 - 0,667 \cdot (2,01 - 1,24) = 46,2$$

По формуле (3.23) рассчитывается дисперсия преобразованного свободного члена.

$$S_{(B_0^*)}^2 = S_{(B_0^{*кр})}^2 + 0,667^2 \cdot [S_{(K_{11})}^2 + S_{(K_{22})}^2] = 0,102 + 0,445 \cdot (0,458 + 0,458) = 0,51$$

Оценка значимости коэффициентов нормализованного уравнения регрессии. Для этого рассчитываются доверительные интервалы по каждой группе коэффициентов с использованием табличного значения критерия Стьюдента, $t_\alpha = 2,262$ при уровне доверительной вероятности $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $m = N(n-1) = 9$

$$\Delta B_0^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(B_0^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,51} = 1,61$$

$$\Delta K_1^* = \Delta K_2^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(K_{ii}^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,153} = 0,88$$

$$\Delta K_{12}^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(K_{12}^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,229} = 1,08$$

$$\Delta K_{11}^* = \Delta K_{22}^* = \pm t_\alpha \cdot \sqrt{S_{(K_{ii}^*)}^2} = 2,262 \cdot \sqrt{0,458} = 1,53$$

Сравнивая по модулю полученные значения коэффициентов регрессии нормализованной математической модели с соответствующими доверительными интервалами, убеждаемся в том, что значимыми являются коэффициенты B_0^* , K_1^* и K_{11}^* , т. е. $L=3$.

Полученная по результатам эксперимента нормализованная математическая модель функции отклика представляется в виде следующего уравнения регрессии:

$$\hat{y} = 46,2 - 6,75 \cdot X_1^* + 2,01 \cdot (X_1^*)^2 \quad (3.28)$$

В результате натурализации математической модели по формуле (3.25), получаем:

$$\hat{y} = 46,2 - 6,75 \cdot \left(\frac{x_1 - 3}{2} \right) + 2,01 \cdot \left(\frac{x_1 - 3}{2} \right)^2$$

$$y = 60,825 - 6,375x + 0,5x^2 \quad (3.29)$$

Проверка адекватности математической модели. Для этого в полученное уравнение регрессии подставляются значения нормализованных уровней, соответствующие условиям проведения всех опытов, и определяются расчетные значения откликов \hat{y}_i , которые сопоставляются с осредненными

экспериментальными данными \bar{y}_i , полученными при тех же условиях. Результаты расчета показаны в табл. 3.12.

Таблица 3.12 – Данные для расчета дисперсии адекватности

№ опыта, <i>i</i>	Нормализованные уровни		Значения откликов		Расхождения	
			экспериментальные	расчетные	$y_э - y_p$	$(y_э - y_p)^2$
	X_1^*	X_2^*	$y_i^э$	y_i^p		
1	1	1	40,5	41,47	-0,97	0,936
2	-1	1	55,5	50,94	4,56	20,784
3	1	-1	39,5	41,47	-1,97	3,871
4	-1	-1	52,5	50,94	1,56	2,430
5	1	0	42	41,47	0,53	0,284
6	-1	0	54,5	50,94	3,56	12,666
7	0	1	44	46,20	-2,20	4,859
8	0	-1	46	46,20	-0,20	0,042
9	0	0	46	46,20	-0,20	0,042
Σ						45,914

По данным этой таблицы рассчитывается дисперсия адекватности математической модели

$$S_{ad}^2 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2}{N - L} = \frac{2 \cdot 45,914}{9 - 3} = 15,305$$

где N и n – число опытов в матрице планирования и число параллельных наблюдений;

L – число значимых коэффициентов регрессии

Расчет фактического значения F -критерия Фишера и сравнение с табличным

$$F = \frac{S_{(y)}^2}{S_{ad}^2} = \frac{1,83}{15,305} = 0,12$$

$$F_{таб} = 8,81 \text{ при } m_1=9, m_2=3, \alpha=0,05$$

Так как фактическое значение F -критерия меньше табличного, полученная нормализованная математическая модель второго порядка (3.29) признается адекватной с доверительной вероятностью 95%.

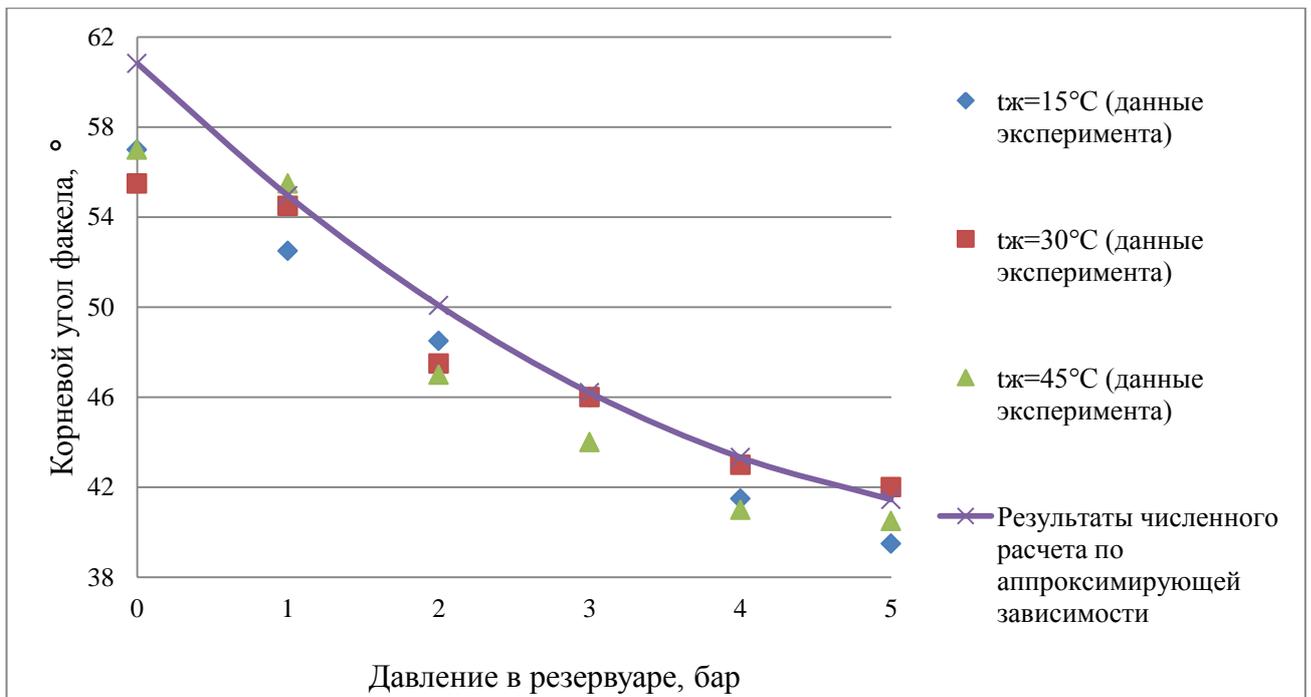


Рисунок 3.12 – Зависимость угла распыла ударно-струйной форсунки от избыточного давления в напорном резервуаре и температуры распыляемой жидкости при скорости истечения жидкости из сопла 35м/с

Результаты численного расчета по натурализованной аппроксимирующей зависимости (3.29) представлены на рис.3.12. По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Корневой угол факела форсунки по паспортным данным совпадает с экспериментальными результатами, и составляет 60°.
2. С увеличением давления корневой угол факела равномерно уменьшается.
3. Температура не оказывает влияния на корневой угол факела.
4. На основе визуального наблюдения за процессом распыла можно сделать вывод, что с увеличением давления уменьшается средний диаметр капли, при одновременном увеличении времени витания.

Глава 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛА ЖИДКОСТИ

Для уточнения результатов эксперимента необходимо разработать расчетную 3D модель и выполнить численное компьютерное моделирование процесса распыливания жидкости.

4.1. О программном пакете Comsol Multiphysics

Для компьютерного моделирования процесса истечения жидкости из форсунки был использован программный пакет Comsol Multiphysics.

COMSOL Multiphysics - программная среда, обеспечивающая все этапы моделирования (определение геометрических параметров, описание физики, визуализация), позволяющая моделировать любые физические процессы, которые могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Среди рассматриваемых дисциплин — механика конструкций, теплоперенос, инженерная химия (в том числе с учётом химической кинетики), электротехника, акустика, геофизика, связанные явления на микроуровне, оптические и высокочастотные эффекты.

Comsol Multiphysics имеет ряд модулей расширения:

- модули электродинамики (AC/DC, радиочастоты, волновая оптика, геометрическая оптика, плазма, полупроводники);
- модули механики и акустики (механика конструкций, акустика)
- модули гидродинамики и теплопередачи (вычислительная гидродинамика, течения в пористых средах, течение в трубопроводах, микрогидродинамика, молекулярные течения, теплопередача)
- модули химии (химические реакции, аккумуляторы и топливные элементы, электроосаждение, коррозия, электрохимия)

Для компьютерного моделирования процесса распыливания жидкости использовался модуль «Вычислительная гидродинамика»

Модуль «Вычислительная гидродинамика» представляет собой платформу для моделирования устройств и систем, в которых реализуются сложные процессы течения жидкости. Как и остальные модули пакета COMSOL®, модуль «Вычислительная гидродинамика» содержит готовые физические

интерфейсы, позволяющие вводить исходные данные задачи через графический пользовательский интерфейс и использовать эти данные при описании уравнений расчетной модели. Отдельные интерфейсы модуля «Вычислительная гидродинамика» позволяют решать самые разные задачи гидродинамики, в том числе задачи о ламинарном и турбулентном течении сжимаемых, неньютоновских жидкостей, двухфазных потоков, потоков в пористой среде и неизотермических потоков. Модуль «Вычислительная гидродинамика» может использоваться как рабочий инструмент для решения задач вычислительной гидродинамики либо, совместно с другими модулями пакета COMSOL[®], — для мультифизического моделирования процессов, в которых течение жидкости имеет определяющее значение.

Графический пользовательский интерфейс модуля «Вычислительная гидродинамика» обеспечивает полный контроль на всех этапах моделирования:

- Выбор режима течения: например, однофазный или двухфазный, ламинарный или турбулентный и т.д.
- Создание или импорт геометрического описания модели
- Описание свойств жидкости
- Добавление источниковых членов и, при необходимости, адаптация уравнений, описывающих течение жидкости
- Выбор типа конечных элементов сетки и контроль плотности сетки в разных частях расчетной области
- Выбор и, если потребуется, настройка алгоритмов решения уравнений (решателей)

Геометрия. Модуль Model Builder специально разработан для создания геометрии, ее подготовки к моделированию. Эта полностью параметрическая среда является простой в использовании, обладает прямыми и двусторонними связями со всеми основными CAD-пакетами и используется как средство согласования и ввода геометрии во все программные продукты Comsol для последующих инженерных расчетов.

Создание сетки. Для получения точных результатов расчетов в области вычислительной динамики жидкостей и газов необходима самая совершенная технология создания сетки. Comsol Multiphysics предоставляет множество технологий построения сетки. Это дает возможность выбрать наиболее подходящий способ построения сетки на основе применения подхода последовательного построения сетки на каждой из деталей сборки. Настройки сетки задают разрешение сетки конечных элементов, которая используется для дискретизации модели. Согласно методу конечных элементов модель разбивается на малые геометрические примитивы. Далее в каждом примитиве с помощью набора полиномиальных функций выполняется приблизительный расчет поля структурного смещения, которое показывает деформацию объекта по каждой из трех координатных осей.

Решатель. В программный пакет COMSOL Multiphysics® версии 5.3 включен новый алгебраический многосеточный (AMG) решатель для вычислительной гидродинамики. Алгебраический многосеточный метод сглаженной агрегации (SA-AMG), расширили для работы с особыми сглаживающими алгоритмами вычислительной гидродинамики в программном пакете COMSOL Multiphysics: сглаживающими алгоритмами SCGS, Vanka и SOR.

Использование альтернативного геометрического многосеточного (GMG) решателя требует создания трех уровней сетки, что может привести к проблемам при попытке построения сетки и решения моделей с изменяющейся геометрической формой на разных масштабах. Для решателя SA-AMG (Алгебраический многосеточный метод сглаженной агрегации) требуется только один уровень сетки, что значительно облегчает построение сетки, а процесс решения значительно более устойчив к крупным проблемам и «трудным» геометриям.

Постобработка. Возможность написания сценариев, полная автоматизированность, генерация отчетов дают пользователю максимальное количество информации, полученной в результате расчетов.

4.2. Компьютерное моделирование процесса распыливания жидкости

Задание геометрии. Процесс распыливания жидкости смоделирован на примере форсунки WL3-60. Геометрические характеристики (рис. 4.1) взяты с сайта производителя [39].

Settings
Parameters

Parameters

Name	Expression	Value	Description
dn1	2.85[mm]	0.00285 m	диаметр входного отверстия форсунки
dn2	4[mm]	0.004 m	диаметр выходного отверстия форсунки
dn3	16[mm]	0.016 m	наружный диаметр форсунки
ln1	30[mm]	0.03 m	длина форсунки
ln2	10[mm]	0.01 m	
lc	1[mm]	0.001 m	длина фаски
rhof	998.2[kg/m ³]	998.2 kg/m ³	плотность жидкости
muf	1.004e-3[Pa*s]	0.001004 Pa*s	вязкость жидкости
Q	1[m ³ /h]	2.7778E-4 m ³ /s	расход

Рисунок 4.1 – Геометрические характеристики форсунки

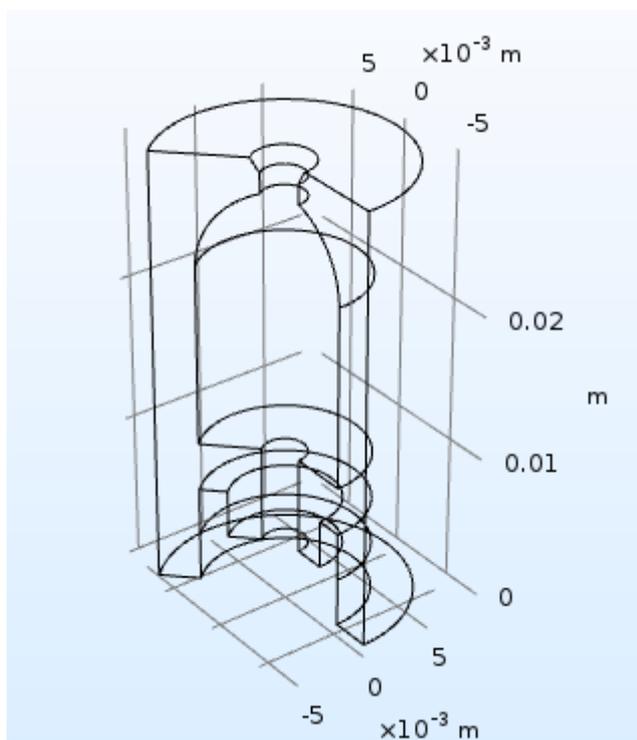


Рисунок 4.2 – Геометрия форсунки

Задание свойств жидкости. В качестве рабочей жидкости задана вода плотностью $\rho=998,2 \text{ кг/м}^3$ и динамической вязкостью $\mu=1,004 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Задание граничных условий. В программном пакете Comsol Multiphysics представлено три интерфейса для моделирования дисперсных сред:

- модель Эйлера-Эйлера;
- модель пузырькового течения;
- модель смешения.

Используемая в данной работе модель Эйлера-Эйлера предназначена для моделирования потока двух сплошных взаимопроникающих несжимаемых сред. Стандартные области применения этой модели — кипящие слои (твердые частицы в газе), осаждение (твердые частицы в жидкости), перенос жидких капель или пузырьков в жидкости. В этой модели требуется найти отдельные решения уравнений Навье-Стокса для каждой из фаз, чтобы рассчитать поле скоростей каждой фазы. Объемная доля дисперсной фазы рассчитывается с помощью отдельного уравнения переноса. Модель Эйлера-Эйлера является наиболее универсальной, но при этом крайне требовательной к вычислительным ресурсам. В рамках этой модели требуется решать две системы уравнений Навье-Стокса, тогда как во всех других представленных здесь моделях решается всего одна система. Модели пузырькового течения и смешения — это упрощенные варианты модели Эйлера-Эйлера, которые требуют дополнительных допущений.

Граничные условия — дополнение к основному дифференциальному уравнению (обыкновенному или в частных производных), задающее его поведение в начальный момент времени или на границе рассматриваемой области соответственно.

Программный пакет Comsol Multiphysics предлагает задать следующие граничные условия:

- Вход (скорость, поле скорости, массовый расход, объемный расход). Для решения данной задачи задан объемный расход жидкости $Q=1 \text{ м}^3/\text{ч}$ (рис.4.3).

- Выход (давление жидкости на выходе). В данной работе процесс распыливания жидкости смоделирован дважды: при давлении жидкости на выходе 0 бар (рис. 4.4) и 5 бар (рис 4.5).

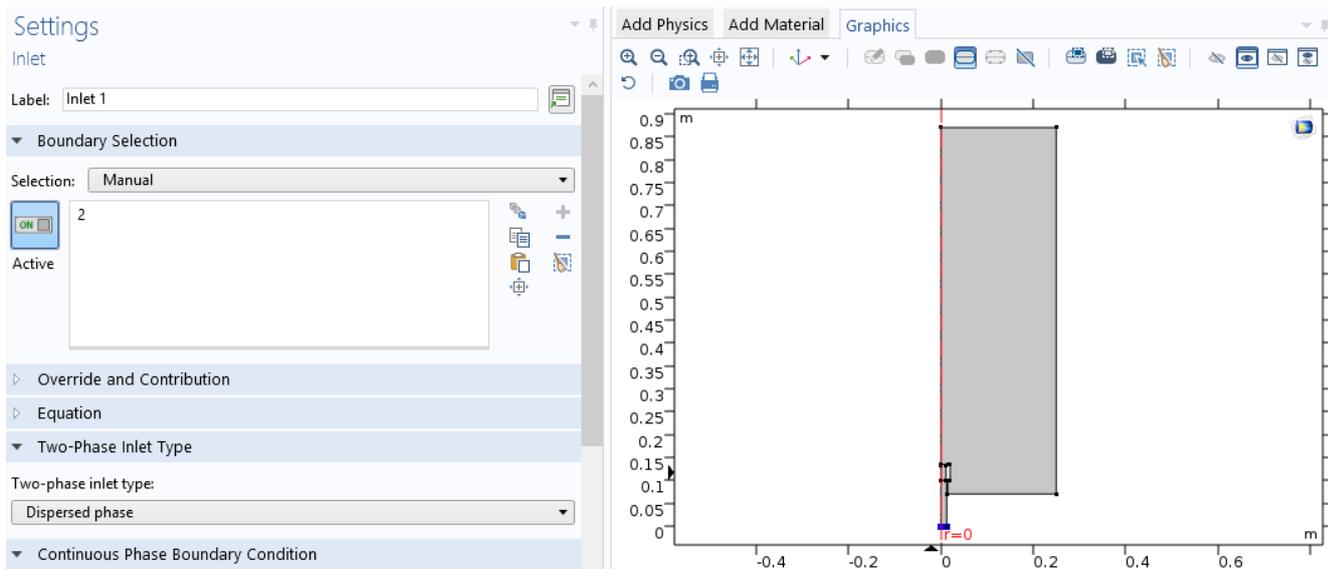


Рисунок 4.3 – Граничные условия на входе

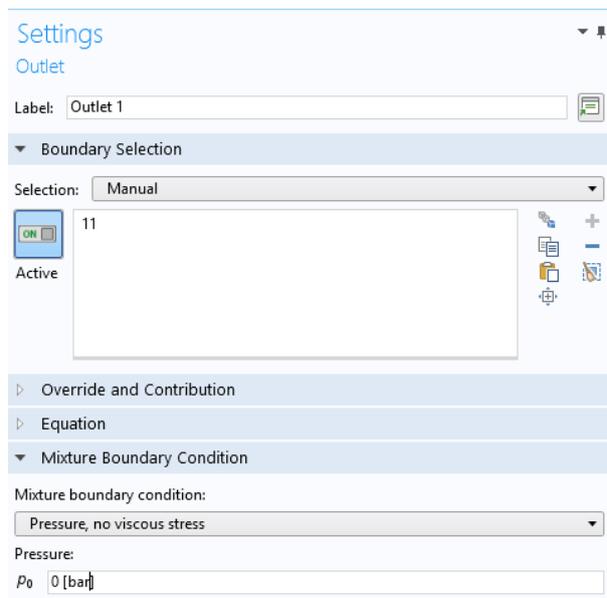


Рисунок 4.4 – Граничные условия на выходе (давление в резервуаре 0 бар)

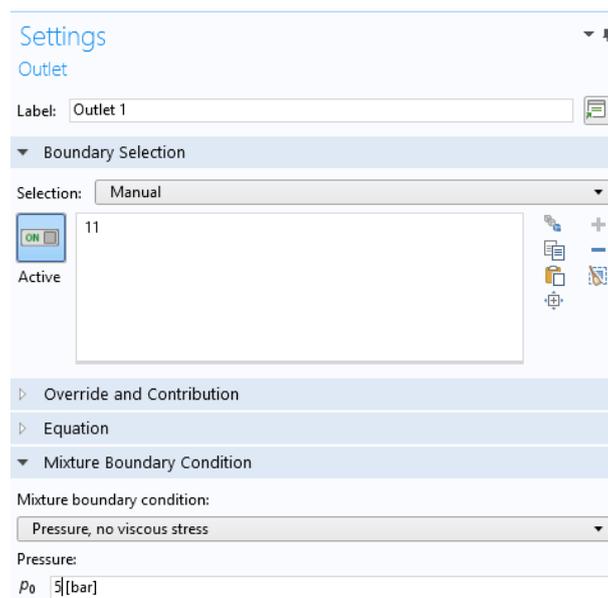


Рисунок 4.5 – Граничные условия на выходе (давление в резервуаре 5 бар)

Построение сетки. После задания всех свойств и граничных условий наступает очередь построения сетки (рис. 4.6).

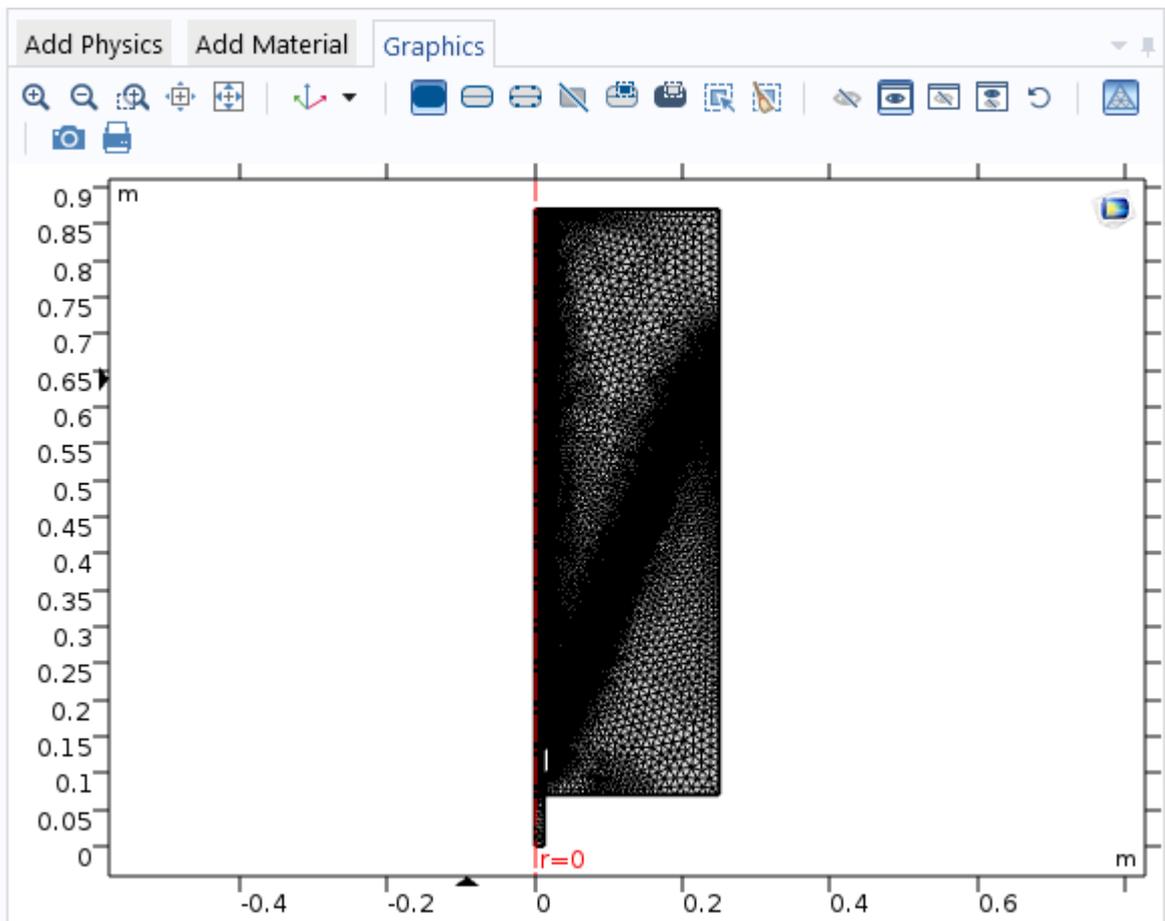


Рисунок 4.6 – Расчетная сеточная модель

Визуализация результатов.

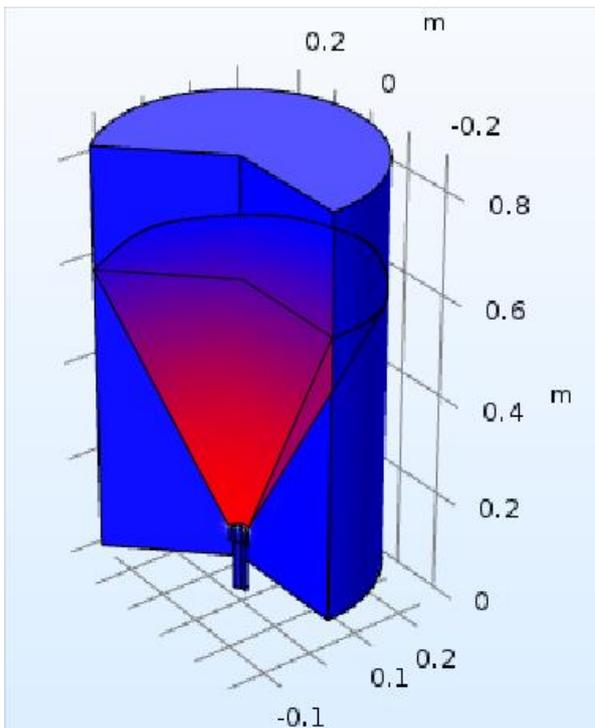


Рисунок 4.7 – Распыливание жидкости при давлении 0 бар

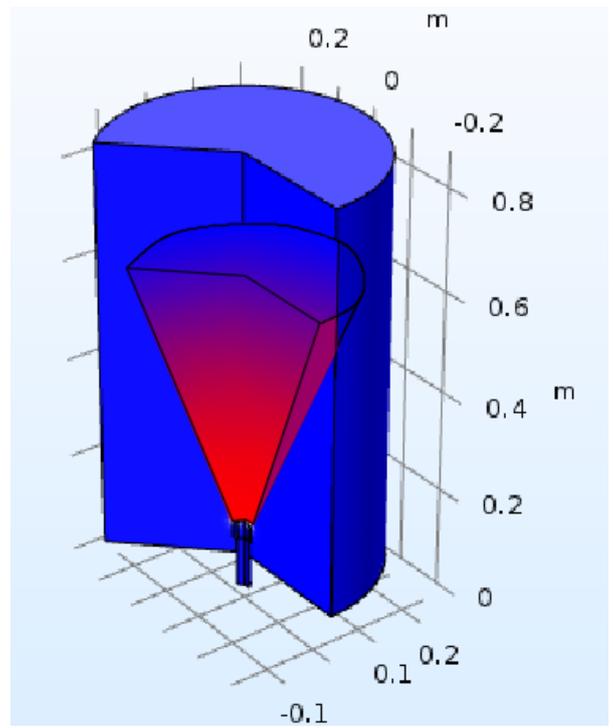


Рисунок 4.8 – Распыливание жидкости при давлении 5 бар

Результаты компьютерного моделирования распыливания жидкости форсункой WL3-60 представлены на рис. 4.7 и 4.8. По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Корневой угол факела распыла жидкости при атмосферном давлении соответствует паспортным данным форсунки WL3-60 и составляет 60° .

2. Корневой угол факела зависит от избыточного давления воздуха в напорном резервуаре и уменьшается с увеличением давления.

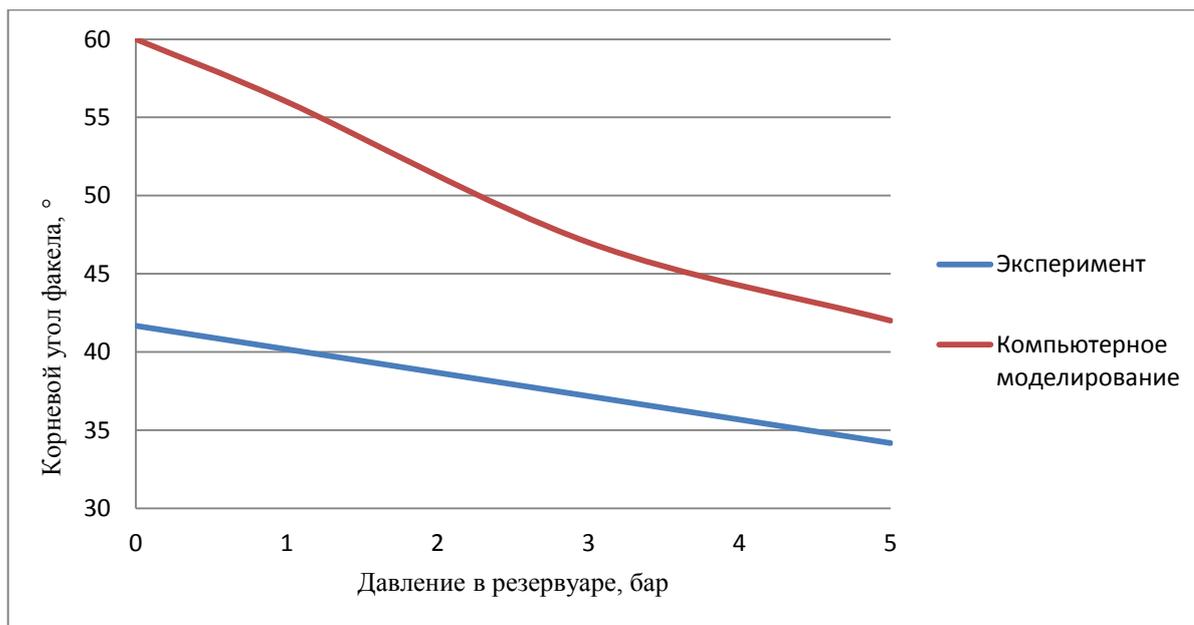


Рисунок 4.9 – Сопоставление результатов эксперимента с данными компьютерного моделирования

Сопоставление результатов эксперимента с данными компьютерного моделирования представлено на рис. 4.9. График показывает плавное уменьшение корневого угла факела с увеличением давления воздуха. Погрешность результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования составляет 18 – 30%, что может быть обусловлено различными асимметриями распылителя, связанными с его конструкцией или качеством его изготовления. При этом при увеличении давления воздуха в резервуаре от 0 до 5 бар корневой угол факела уменьшился по результатам эксперимента в 1,2 раза, по результатам компьютерного моделирования – в 1,4 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом магистерской диссертации стало получение аппроксимирующих зависимостей и расчетной 3D модели, описывающих изменения корневого угла факела распыла ударно-струйной и центробежно-струйной форсунок в зависимости от избыточного давления в напорном резервуаре и температуры жидкости.

Согласно полученным аппроксимирующим зависимостям корневой угол факела снижается при увеличении давления и практически не изменяется при изменении температуры. Однако степень снижения угла распыла неодинакова и зависит от конструкции форсунок.

В ходе эксперимента не было учтено влияние скорости истечения жидкости из форсунки на величину угла распыливания. В дальнейшем планируется оснастить насос частотным регулятором, что позволит плавно изменять расход жидкости и оценить влияние данного фактора на корневой угол факела.

Также в данной магистерской диссертации было выполнено компьютерное моделирование процесса распыливания жидкости, в результате которого была подтверждена теория о влиянии избыточного давления на корневой угол факела распыла.

В дальнейшем планируется провести теоретические и экспериментальные исследования по определению влияния избыточного давления воздуха на диаметр капель.

Список использованных источников

1. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками / под ред. Кутателадзе С.С. – М.: Государственное энергетическое издание, 1962.
2. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А., Новиков Б.В., Ягодкин В.И. Распыливание жидкостей – М.: «Машиностроение», 1977 – 208с.
3. Пажи Д. Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М. Химия, 1984
4. Пажи Д. Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей. – М. Химия, 1979 – 216 с.
5. Карякина М. И., Попцов В. Е. Технология полимерных покрытий – М.: «Химия», 1983.
6. Коровина Н. В. Создание аэрозольных сред с помощью автономных распылительных устройств, их эволюция и распространение в замкнутых объемах: дис. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. Наук. – Бийск, 2014
7. Физические основы ультразвуковой техники / Под ред. Л. Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 224 с.
8. Молчанов Г.И. Ультразвук в фармации. – М.: Медицина, 1980.– 176 с.
9. Пат. № 2171719. Российская Федерация, МПК В05В7/08. Краскораспылитель. Залюбовский А.Ф., Кравченко А.М., Фурсов Ю.И., Медведев Ю.С. Заявитель и патентообладатель: Военный автомобильный институт.заявл.05.01.2000. Опубликовано: 10.08.2001
10. Пат. №2525493. Российская Федерация, МПК В05В 7/16. УСТРОЙСТВО ДЛЯ НАГРЕВА ЗАЩИТНОЙ СМАЗКИ ПРИ НАНЕСЕНИИ НА СЕЛЬХОЗМАШИНЫ. Петрашев А.И., Клепиков В. В., Шумов Ю. А. Заявитель и патентообладатель: Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИТиНРоссельхоз академии).заявл.04.03.2013. Опубликовано: 20.08.2014 Бюл. №23.

11. Пат. №2042438. Российская Федерация, МПК F02M 47/02. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ФОРСУНКА ДЛЯ ДИЗЕЛЯ. Голубков Л. Н., Шатров М. Г., Дунин А. Ю., Душкин П. В., Николаев К. А. Заявитель и патентообладатель: Российская Федерация, от имени которой выступает МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОЙ ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. заявл. 29.10.2012. Опубликовано: 10.06.2014 Бюл. №16.

12. Пат. №2503505. Российская Федерация, МПК B05B 5/00, A01G 25/16, A01C 23/04, B05B 7/04, B05B 7/32, A01M 7/00. СПОСОБ ЛИСТОВОЙ ПОДКОРМКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР. Пахомов В. И., Рыков В. Б., Камбулов С. И., Вялков В. И., Ксёنز А. Я., Шкрабак С. Н., Шкрабак Е. С., Шкрабак Т. В. Заявитель и патентообладатель: Государственное научное учреждение Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельскохозяйственных наук (ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии), Общество с ограниченной ответственностью «СевЗапАгро» (ООО «СевЗапАгро»). заявл. 13.01.2012. Опубликовано: 10.01.2014 Бюл. №1.

13. Пат. №2232503. Российская Федерация, МПК A01M7/00, B05B3/02. РАСПЫЛИТЕЛЬ ЖИДКОСТИ. Гнучев В. Ф., Мироненко В. М., Муращенко В. Г., Трубицин И. Т., Широков В. Б. Заявитель и патентообладатель: Открыто акционерное общество «ОПТРОН». заявл. 21.11.2002. Опубликовано: 20.07.2004.

14. Пат. №2535720. Российская Федерация, МПК B05B 17/04. АКУСТИЧЕСКИЙ РАСПЫЛИТЕЛЬ КОЧЕТОВА. Кочетов О. С., Стареева М. О., Стареева М. М. Заявитель и патентообладатель: Кочетов О. С., Стареева М. О., Стареева М. М. заявл. 25.04.2013. Опубликовано: 20.2.2014 Бюл. №35.

15. Пат. №2357150. Российская Федерация, МПК F23D 11/34. АКУСТИЧЕСКИЙ РАСПЫЛИТЕЛЬ ЖИДКОГО ТОПЛИВА. Кочетов О. С., Кочетова М. О. Заявитель и патентообладатель: Кочетов О. С. заявл. 23.01.2008. Опубликовано: 27.05.2009 Бюл. №15.

16. Пат. №2446895. Российская Федерация, МПК B05B 17/06. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬ ЖИДКОСТИ. СОЗАД Жан-Дени.

Заявитель и патентообладатель: ТЕЛЕМАК. заявл. 12.11.2007. Опубликовано: 10.04.2012 Бюл. №10.

17. Пат. №2481160. Российская Федерация, МПКВ05В 17/06. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬ. Хмелёв В. Н., Шалунов А. В., Генне Д. В., Шалунова А. В., Голых Р. Н. Заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ». заявл. 18.11.2011. Опубликовано: 10.05.2013 Бюл. №13.

18. Пат. №2500483. Российская Федерация, МПК В05В 5/10, В05В 5/053. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ. СЕЙТЦ Дэвид . М., ХЭССЕЛШВЕРТ Дэниел Дж., СЕДОЗ Роджер Т., БАЛЬТЦ Джемс П., БРАЙАНТ Джессика Роуз. Заявитель и патентообладатель: ИЛЛИНОЙС ТУЛ ВОРКС ИНК. заявл. 24.02.2011. Опубликовано: 10.12.2013 Бюл. №34.

19. Пат. №2345242. Российская Федерация, МПК F02М 61/16. РАСПЫЛИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ. Кухарев М. Н., Белоглазов А. В. Заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Воронежский государственный аграрный университет им. К. Д. Глинки. заявл. 19.07.2007. Опубликовано: 27.01.2009 Бюл. №3.

20. Пат. №2519538. Российская Федерация, МПК F02М47/02. ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ФОРСУНКА ДЛЯ ДИЗЕЛЯ. Голубков Л. Н., Душкин П. В., Шатров М. Г., Дунин А. Ю., Николаев К. А. Заявитель и патентообладатель: Российская Федерация, от имени которой выступает МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ.

21. Методические рекомендации к лабораторной работе для студентов специальностей 240706 «Автоматизированное производство химических предприятий» и 260601 «Машины и аппараты пищевых производств»: [Электронный ресурс]. URL: <https://domashke.net/referati/ostalnye-referaty/referat-metodicheskie-rekomendacii-k-laboratornoj-rabote-dlya-studentov-specialnostej->

[240706-avtomatizirovannoe-proizvodstvo-himicheskikh-predpriyatij-i260601-mashiny-i-apparaty-pishhevyh-proizvodstv](#) (Дата обращения: 17.05.2017)

22. Семенов Б. А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях. М., СПб., Краснодар. Лань. – 2013.

23. Pilch M., Erdman C.A. Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of liquid drop.// Int. J. MultiphaseFlow , 1987, V. 13, pp. 741–757

24. [Электронный ресурс].

URL:https://services.bete.com/scripts/cgiip.exe/select/z_SelSeries.r?caplic=99.9(Дата обращения: 17.05.2017)

25. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова А. В. Ультразвуковое распыление жидкостей: монография. – Бийск: Издательство Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова, 2010.

26. Блох А.Г., Кичкина Е.С. Распыливание жидкого топлива механическими форсунками центробежного типа, Сб. Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах, Госэнергоиздат, 1958

27. Уатсон Э., Кларк Дж. Аппаратура и процессы сгорания, Сб. Физика и химия реактивного движения № 3, Издат. иностранной литературы, 1949.

28. Turner G.M., Moulton R.W. Drop size distribution from spray nozzles, Chem. Eng. Progress, 1953, 49, № 4 а. 5.

29. Основы горения углеводородных топлив, Издат. иностранной литературы, 1960.

30. Tate R. W., Marschall W. R. Atomization by centrifugal pressure nozzles, Chem. Eng. Progress, 1953, 49, № 4.

31. Woltjen A. UberdieFeinheitderBrenstoff-zerstaubung, Darmstadt, 1925.

32. Ли Д. У. Сб. Двигатели внутреннего сгорания, под ред. Васильева С. Н., ОНТИ НКТП СССР, 1936

33. Засс Ф. Сб. Двигатели внутреннего сгорания, под ред. Васильева С. Н., ОНТИ НКТП СССР, 1936

34. Лышевский А. С. Тонкость распыливания жидкого топлива обычными форсунками. Теплоэнергетика, 1956 - № 10.
35. De Corso Effect of ambient and fuel pressure on spray drop size. Journ. of Eng. For power, Trans. ASME, Series A, 1960, 82, №1.
36. Белов И. А. ИФЖ, 1974, №12
37. Шлихтинг Т. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1974.
38. Абрамович Г.Н. Теория центробежной форсунки – В кн.: Промышленная аэродинамика. М., БНТ ЦАГИ, 1944
39. ВЕТЕ. Performance through engineering [Электронный ресурс]. URL: http://www.bete.com/spraypatterns/fan_index.html (Дата обращения: 17.05.2017)
40. Основы горения углеводородных топлив. Издат. Иностранной литературы, 1960
41. Кнорре Г. Ф. Топочные процессы. Госэнергоиздат, 1959.
42. Пат. №2593257. Российская Федерация, МПКС02F 9/02, С02F 1/24, С02F 1/40, С02F 1/20, С02F 1/74, В01D 17/035, В03D 1/14, В01F 3/04, В01D 19/00. УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ И СТОЧНЫХ ВОД. Еськин А. А., Захаров Г. А., Ткач Н. С., Морозова А. А., Ким М. И., Злыднев Н.Н. заявл.: 14.08.2015. Опубликовано: 10.08.2016 Бюл. №22.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)

Инженерная школа
Кафедры инженерных систем зданий и сооружений

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ ВКР

на выпускную квалификационную работу студентки

Ким Марины Игоревны

(фамилия, имя, отчество)

направление 08.04.01. «Строительство»

профиль «Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий» группа М32196

Руководитель ВКР

доцент, канд. техн наук Г. А. Захаров

(ученая степень, ученое звание, и. о. фамилия)

На тему Исследование влияния избыточного давления на характеристики факела гидравлической форсунки

Дата защиты ВКР «06» июля 2018г.

Магистерская диссертация выполнена на основании патента РФ на изобретение №2593257 «Установка для очистки нефтесодержащих и сточных вод». Выполнен анализ существующих способов распыливания жидкости. Рассмотрены теоретические особенности процесса распыливания жидкости. Разработана установка и методика проведения эксперимента по определению корневого угла факела форсунки в зависимости от избыточного давления воздуха и температуры жидкости. На основании экспериментальных исследований выведены аппроксимирующие зависимости, описывающие изменения корневого угла факела в зависимости от избыточного давления в напорном резервуаре и температуры жидкости. Выполнено компьютерное моделирование процесса распыливания. Получено качественное совпадение результатов моделирования с результатами экспериментального исследования.

При написании выпускной квалификационной работы Ким Марина Игоревна показала умение решать практические задачи, высокий уровень владения современными методами поиска, обработки и использования научно-технической литературы.

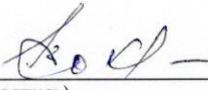
Качество изложения материалов и оформление выпускной квалификационной работы выполнено в соответствии с требованиями.

К недостаткам выпускной квалификационной работы можно отнести отсутствие оценки влияния скорости истечения жидкости из форсунки на величину корневого угла факела.

Представленная работа заслуживает оценки **отлично**, а Ким Марина Игоревна присвоения академической степени магистра по направлению 08.04.01 «Строительство».

Оригинальность текста ВКР составляет 74 %.

Руководитель ВКР к. т. н., профессор
(уч. степень, должность)


(подпись)

Г. А. Захаров/
(и. о. фамилия)

«29» июня 2018 г.



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Дальневосточный федеральный университет»
(ДВФУ)

Инженерная школа

Кафедры инженерных систем зданий и сооружений

РЕЦЕНЗИЯ

на выпускную квалификационную работу студентки

Ким Марины Игоревны

(фамилия, имя, отчество)

направление (специальность) Теплогазоснабжение населенных мест и предприятий

группа М32196

Руководитель ВКР

кандидат технических наук, доцент Г. А. Захаров

(ученая степень, ученое звание, и. о. фамилия)

На тему: Исследование влияния избыточного давления воздуха на характеристики
факела гидравлической форсунки

Дата защиты ВКР «06» июля 2018 г.

1 Актуальность ВКР, ее научное, практическое значение и соответствие заданию

Работа посвящена исследованию влияния избыточного противодавления воздушной Среды на параметры факела гидравлической форсунки. Процесс распыливания Находит широкое применение в различных отраслях – энергетике, медицине, Нанотехнологиях. Данные области являются приоритетными для развития Российской Федерации, что свидетельствует об актуальности ВКР

2 Достоинства работы: умение работать с литературой, последовательно и грамотное излагать материал, оригинальность идей, раскрытие темы, достижение поставленных целей и задач

Выполнен анализ существующих способов распыливания жидкости. Рассмотрены теоретические особенности процесса распыливания жидкости. Разработана установка и методика проведения эксперимента по определению корневого угла факела форсунки в зависимости от избыточного давления воздуха и температуры жидкости. На основании экспериментальных исследований выведены аппроксимирующие зависимости, описывающие изменения корневого угла факела в зависимости от избыточного давления в напорном резервуаре и температуры жидкости. Выполнено компьютерное моделирование процесса распыливания. Получено качественное совпадение результатов моделирования с результатами экспериментального исследования. поставленные цели и задачи решены в полном объеме.

3 Недостатки и замечания (как по содержанию, так и по оформлению)

К недостаткам ВКР можно отнести отсутствие разработанного алгоритма расчета напорных резервуаров, в которых осуществляется распыливание жидкости

под избыточным давлением. В работе не было учтено влияние скорости истечения жидкости из форсунки на величину угла распыливания, рекомендуется в дальнейшем оценить влияние данного фактора на корневой угол факела

4 Целесообразность внедрения, использование в учебном процессе, публикации и т.п.

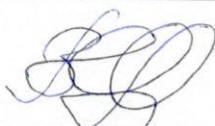
Результаты работы могут быть внедрены при проектировании устройств и технологических процессов, в которых осуществляется распыливание жидкости под избыточным давлением.

5 Общий вывод: (о присвоении соответствующей квалификации и оценка: отлично, хорошо, удовлетворительно)

В целом работа заслуживает оценки **отлично**, а Ким Марина Игоревна присвоения академической степени магистра по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство»

Оценка отлично

Рецензент Щетинин М. В.
(и. о. фамилия)


(подпись)

генеральный директор ООО «ДАЛЬСТАМ», кандидат технических наук
(должность по основному месту работы, ученая степень, ученое звание)

«29» июня 2018 г.



