Федеральное агентство по образованию

**Бийский технологический институт (филиал)**

государственного образовательного учреждения

высшего профессионального образования

«Алтайский государственный технический университет

имени И.И. Ползунова»

**С.А. Светлов**

**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ**

Методические рекомендации

к лабораторной работе для студентов специальностей

240706 «Автоматизированное производство химических   
предприятий» и 260601 «Машины и аппараты пищевых производств»

Бийск

Издательство Алтайского государственного технического университета

им. И.И. Ползунова

2008

УДК 66.069.83

|  |  |
| --- | --- |
| Рецензент: | к.т.н., зав. лабораторией ИПХЭТ СО РАН  М.С. Василишин |

**Светлов, С.А.**

|  |  |
| --- | --- |
|  | Изучение работы центробежной форсунки: методические рекомендации к лабораторной работе для студентов специальностей 240706 «Автоматизированное производство химических предприятий» и 260601 «Машины и аппараты пищевых производств» / С.А. Светлов; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2008. – 36 с. |

В методических рекомендациях рассмотрены вопросы течения жидких сред в распылительных устройствах, методы исследования и экспериментальное определение коэффициента расхода центробежной форсунки и параметров процесса.

Методические рекомендации предназначены для студентов специальностей 240706 и 260601 всех форм обучения, изучающих дисциплины «Охрана окружающей среды на предприятиях отрасли», «Машины и агрегаты для переработки и изготовления смесей» и «Машины и аппараты масложировых производств».

**УДК 66.069.83**

Рассмотрены и одобрены

на заседании кафедры

технологии химического

машиностроения.

Протокол № 4 от 7 ноября 2007 г.

© С.А. Светлов, 2008

© БТИ АлтГТУ, 2008

# ВВЕДЕНИЕ

Разработка теоретических основ процессов и аппаратов, используемых в химической и пищевой промышленности, например, при сушке, абсорбции, экстракции, а также в других технологических процессах, в которых применяют распыление жидкостей, связана с расчетом и проектированием распыляющих устройств. Во всех подобных процессах уменьшение размеров капель жидкой среды, необходимое распределение их в рабочем объеме аппарата обеспечивает лучшее взаимодействие фаз, повышение интенсивности тепло- и массообмена, что позволяет существенно уменьшить габаритные размеры аппаратов. Достижения в области теории распыления жидких сред послужили основой для создания скоростных прямоточных контактных устройств, высокоэффективных сушильных установок, грануляторов, абсорберов и других машин и аппаратов.

Устройства для распыления жидких сред (форсунки) широко применяют в современной технике во многих отраслях народного хозяйства для сушки продуктов, смешивания сред, нанесения покрытий на частицы дисперсных материалов и рабочие поверхности оборудования, очистки газовых потоков от загрязнений, охлаждения теплоносителей и т.д. Форсунки бывают струйные, центробежные, с пневматическим распылением, с вращающимися распыляющими элементами (дисками) и акустические. Распыление вращающимися дисками пригодно для диспергирования суспензий и вязких жидкостей, но требует значительно большего расхода энергии, чем использование механических распылителей [1]. Скорость вращения дисков составляет от 4000 до 20000 об/мин. Распыление механическими форсунками, в которые жидкость подаётся насосом под давлением от 0,2 до 20 МПа более экономично, но применяется только для жидкостей, не содержащих твердых взвесей, вследствие чувствительности данных форсунок к засорению. Пневматические форсунки, работающие при воздействии сжатого газа на поток жидкости, хотя и пригодны для загрязнённых жидкостей, но отличаются неоднородностью распыления. Акустические форсунки малопроизводительны и не нашли широкого применения в промышленности.

Основное отличие центробежной форсунки от форсунок других типов состоит в том, что жидкость, протекающая через неё, приобретает момент количества движения относительно оси сопла. Одной из важнейших характеристик форсунки является коэффициент расхода.

Целью лабораторной работы является изучение процесса распыления жидких сред, теоретическое и экспериментальное определение коэффициента расхода и параметров работы центробежной форсунки.

Оборудование и приборы, используемые при выполнении работы: лабораторная установка для изучения процесса распыления жидких сред, комплект центробежных форсунок с различным диаметром каналов, контрольно-измерительные приборы.

# 1 РАСПЫЛЕНИЕ ЖИДКИХ СРЕД ФОРСУНКАМИ

Распыление жидкостей является сложным процессом, зависящим от многих факторов. Распад струи на капли и дробление капель происходит [2] на выходе струи из распылителя под действием внешних и внутренних сил.

К внешним – аэродинамическим силам относятся силы взаимодействия распыляемого компонента со средой, в которую он впрыскивается. Их значение зависит от плотности окружающей среды, скорости струи и размеров капель жидкости. К внешним силам относятся также силы взаимодействия при пересечении струй или при встрече струй с твердой стенкой. С увеличением скорости движения струи относительно среды, в которую происходит впрыск, влияние внешних сил растет, что приводит к быстрейшему её дроблению и, следовательно, к улучшению качества распыления.

К внутренним силам относятся молекулярные силы и турбулентность потока. В струе вытекающей жидкости возникают турбулентные пульсации, интенсивность которых зависит от её плотности, вязкости, перепада давления, а также от конструкции распылителя. Увеличение скорости истечения способствует увеличению интенсивности турбулентных пульсаций, что в свою очередь, улучшает качество распыления.

**1.1 Особенности способов распыления жидких сред**

Дробление жидкости и образование капель происходит следующим образом. При впрыске жидкости, например форсункой, под действием внешних сил и турбулентных пульсаций струя жидкости распадается на частицы различной величины и формы. Малые частицы под действием поверхностного натяжения принимают форму шара и образуют капли; крупные частицы продолжают распадаться дальше.

Дисперсность распыляемой жидкости характеризуется средним диаметром образующихся капель, чем меньше средний диаметр капель, тем лучше распыл. Часто в качестве характеристики дисперсности распыла жидкости вводится так называемый медианный диаметр капель, который соответствует диаметру половины общего числа всех капель. Это значит, что из общей массы капель половина будет обладать размерами больше, а половина − меньше медианного диаметра. Иногда дисперсность распыла характеризуется средним диаметром капли, под которым подразумевается тот диаметр, который имели бы капли одинакового размера, если бы их общая поверхность и общий объем были такими же, как и в струе, состоящей из капель различных размеров. Неравномерность распыления характеризуется отношением истинного числа капель к тому числу, которое получилось бы, если бы все частицы имели одинаковый диаметр.

Для исследуемой конструкции форсунки диаметр капель зависит от диаметра сопла, скорости впрыска жидкости, её вязкости, плотности, поверхностного натяжения и плотности среды, в которую производится впрыск. В современных распылительных устройствах достигаемый диаметр капли диспергированной жидкости составляет от 15 до 250 мкм. Это значит, что в 1 см3 распыленной жидкости содержится примерно 6·106 капель. Однородность распыления характеризуется диапазоном изменения диаметров капель в факеле распыленной жидкости. Чем уже этот диапазон, тем больше однородность распыла.

**1.2 Способы распыления жидкостей**

В работе [3] предложено классифицировать распыление исходя из условий перемещения струи. Исходя из этого можно выделить следующие способы распыления жидкости: гидравлическое, механическое, пневматическое, пульсационное, ультразвуковое и электрическое.

При гидравлическом способе распыления жидкость дробится за счет давления нагнетания при свободном распаде струи (пленки или первичных крупных капель), вытекающей с большой скоростью из соплового отверстия распылителя. Распыляющие устройства, с помощью которых реализуется этот способ, широко известны под названием механических (гидравлических) форсунок. В зависимости от скорости истечения жидкости из форсунки различают несколько видов распада струи. При малых скоростях струя на некотором расстоянии от сопла, благодаря возникающим осесимметричным деформациям (амплитуда которых постепенно возрастает), распадается на отдельные крупные капли равных диаметров [4]. С увеличением скорости истечения жидкости возникают волнообразные деформации, ось струи искривляется, эти деформации усиливаются и приводят к волнообразному распаду. Наконец, при дальнейшем увеличении скорости струи длина не распавшегося участка резко сокращается, и струя начинает распадаться вблизи сопла. Последний вид распада называют распылением [3].   
Аналогично распадаются жидкостные пленки. При малой скорости истечения пленка не имеет разрывов и под действием сил поверхностного натяжения стягивается, образуя «пузырь», с нижней точки которого срываются крупные капли. При дальнейшем увеличении скорости истечения длина пленки сокращается, пока распад не начинается непосредственно вблизи сопла. Результаты опытов показали [5], что не распавшийся участок струи сохраняется даже при очень высоких давлениях. По оценочным расчетам нарушение сплошности для воды наблюдается примерно при давлении 5·105 кПа. Распад капель также зависит от скорости истечения. При малой скорости капли не дробятся и увлекаются воздухом. С увеличением скорости капли теряют устойчивость и распадаются на более мелкие. При очень больших скоростях капля под влиянием перепада давления на её поверхности образует тело, похожее на эллипсоид, который быстро сплющивается в центре и превращается в жидкое кольцо с тонкой оболочкой. Диаметр кольца   
всё более увеличивается, оболочка разрушается и появляется множество мельчайших капель. Наконец и само кольцо дробится на мелкие капли [6].

Гидравлическое распыление самое экономичное (затрачивается от 2 до 4 кВт на 1 тонну жидкости), однако создаваемый при этом распыл довольно грубый и неоднородный. Затруднено регулирование расхода жидкости при заданном качестве дробления, а также распыление высоковязких жидкостей в холодном состоянии. Вместе с тем этот способ наиболее широко распространен вследствие сравнительной его прос-тоты.

Механическое распыление осуществляется с помощью механизмов, вращающихся от специального привода. Жидкость приобретает кинетическую энергию вследствие действия центробежных сил. Как и в случае гидравлического распыления, в зависимости от конструкции распыляющего механизма (диск, стакан, конус и др.), дроблению подвергается струя или пленка жидкости. Характер дробления жидкости в данном случае в значительной мере определяется её расходом. При очень малом расходе на кромке вращающегося диска возникает жидкий тор, который под действием центробежных сил деформируется и на нём образуются шаровидные узлы, затем они отрываются в виде отдельных капель. При увеличении расхода эти узлы вытягиваются в тонкие струи и нити [5]. Число нитей увеличивается, достигая постоянной величины. При дальнейшем увеличении расхода нити не могут пропустить всю жидкость из тора, жидкость сбрасывается с кромки и образует пленку. Вначале эта пленка вытягивается на определенное расстояние от кромки, а далее распадается на нити и крупные капли. К достоинствам этого способа следует отнести возможность распыления высоковязких и загрязненных жидкостей и широкого регулирования производительности распылителя без существенного изменения дисперсности. Основные недостатки вращающихся распылителей: высокая стоимость, сложность в изготовлении и эксплуатации, большая энергоемкость (15 кВт на 1 тонну жидкости) и, кроме этого, наличие вентиляционного эффекта. Механическое распыление используют главным образом для дробления вязких жидкостей и суспензий.

В случае пневматического распыления диспергирование является следствием динамического взаимодействия потока распыляемой жидкости с потоком распыляющего газа (пара) [7, 8]. Последний выходит из канала с большой скоростью (от 50 до 300 м/с), скорость же истечения струй жидкости невелика. При большой относительной скорости потоков между струями газа и жидкости возникает трение, вследствие чего струя жидкости, будучи как бы закрепленной с одной стороны, вытягивается в отдельные тонкие нити. Эти нити в местах утончения быстро распадаются и образуют мелкие капли. Длительность существования статически неустойчивой формы в виде нитей зависит от скорости газа и физических свойств жидкости. Чем больше скорость, тем тоньше нить, тем меньше период её существования и тем более мелким получается распыл. К достоинствам пневматического способа относятся: малая, по сравнению с гидравлическим, зависимость качества распыления oт расхода жидкости, надежность в эксплуатации, возможность распыления высоковязких жидкостей. Недостатки: повышенный расход энергии на распыление (от 50 до 60 кВт на 1 тонну жидкости), необходимость в распыляющем агенте и в связанном с ним оборудовании.

При электрическом распылении струя (пленка) жидкости подаётся в область сильного электрического поля [9]. Под действием этого поля на поверхности жидкости происходит некоторое распределение давления, которое деформирует струю. Деформации могут достичь большой амплитуды и привести к образованию тонких струй, которые затем дробятся [10]. Недостатки электрического распыления: необходимость в громоздком и дорогостоящем оборудовании, его высокая энергоёмкость, а также весьма незначительная производительность и сложность обслуживания. Вместе с тем этот метод находит применение в некоторых распылительных сушилках и в процессах окраски поверхностей методом распыления.

Ультразвуковое распыление может осуществляться по двум схемам [3, 11]. В одном случае струя (пленка) жидкости подается на колеблющийся элемент пьезоэлектрического или магнитострикционного генератора, в другом она подвергается действию ультразвуковых колебаний воздуха [12]. По сущности протекающих процессов – это два различных способа, которые объединяет лишь наложение на жидкость колебаний сверхзвуковых частот. Поэтому первый способ распыления называется ультразвуковым, а второй – акустическим. В указанных распыляющих устройствах под действием ультразвука в жидкой среде происходит комплекс физических и физико-химических процессов, к числу которых, в первую очередь, относят кавитацию, звуковое давление, акустическое течение [13]. Воздействие звукового излучения и звукового давления приводит к отрыву отдельных капель с гребней микроволн. Распаду струи способствует интенсивное образование кавитационных зон [14].

Явление кавитации связано с большой чувствительностью жидкостей к растягивающим усилиям. При прохождении фазы разряжения ультразвуковой волны в жидкости возникает большое количество разрывов в виде мельчайших полостей (каверн), называемых кавитационными пузырьками. Образовавшиеся пузырьки в следующем полупериоде сжатия резко захлопываются. Причем, если одиночный пузырек расширяется сравнительно медленно, то сжимается он особенно в последней стадии чрезвычайно быстро [15]. При захлопывании кавитационной полости пар не успевает конденсироваться на её поверхности, давление и температура в полости резко возрастают, достигая значений 3·105 кПа и 6000 К. Пар, сжатый в микрообъеме полости, стремительно расширяется, и в жидкости возникает ударная волна, подобная точечному взрыву, приводящая к тонкому дроблению струи (пленки) жидкости (размер капель при этом составляет от 120 до 20 мкм и менее). Недостатками пьезоэлектрических и магнитострикционных устройств являются: их малая производительность (от 0,5 до 6 л/ч) и необходимость сложного дорогостоящего оборудования.

В акустических распылителях используют неустойчивость газовой струи, с которой соприкасается струя или пленка жидкости. Колебания газовой струи резко увеличиваются в результате различных волновых явлений, возникающих в жидкости, особенно в резонансной области. Последние приводят к значительно более тонкому дроблению жидкости, чем обычное пневматическое распыление. Так, отмечается в работе [15], если для уменьшения размера капель со 120 до 110 мкм при пневматическом распылении требуется увеличить энергию на   
5 Вт/кг жидкости, то при акустическом распылении только на 0,15 Вт/кг, т.е. в 30 раз меньше. Таким образом, аэродинамическое ультразвуковое распыление, сохраняя все недостатки пневматического распыления, является более экономичным и перспективным. Однако конструкция ультразвуковых распылителей значительно сложнее.

Пульсационное распыление заключается в том, что возмущения, вызывающие дробление струи (пленки) жидкости, усиливаются за счет пульсаций давления и изменения расхода, которые создаются периодическим перекрытием проходных каналов (или соплового отверстия) распылителя. Пульсации давления приводят к увеличению поверхностной энергии струи, быстрой потере устойчивости и как следствие к более тонкому распылению, чем при первых трех способах. Пульсационное распыление может сочетаться с любым из рассмотренных выше способов, т.е. может быть реализовано пульсационно-гидравлическое, пульсационно-механическое, пульсационно-пневматическое распыление и т.д. При этом преимущества того или иного способа дополняются повышением качества и однородности дробления, происходящем в ряде случаев без увеличения энергозатрат и при незначительном усложнении конструкции распылителей. Таким образом, пульсационное распыление является весьма перспективным. Вместе с тем этот способ диспергирования жидкостей практически еще не изучен.

Анализ способов распыления жидкостей [16–19] позволяет сделать следующие выводы:

– течение жидкости перед распылением должно быть преобразовано в такие формы (струя, пленка), которые обладают наибольшей поверхностной энергией, а поэтому неустойчивы и быстро распадаются;

– распыление жидкости при любых способах обусловлено потерей устойчивости течения в струях или пленках в связи с возникновением на поверхности раздела жидкости и газа неустойчивых волн;

– в зависимости от конкретных условий производства и требований к качеству и дисперсности готового продукта наиболее экономичным может оказаться любой способ распыления.

**1.3 Конструкции распылителей**

Способ распыления зависит от конструкции распыляющего устройства. Каждый из распылителей имеет свои преимущества и недостатки, связанные с особенностями дробления подводимой струи жидкости, с учетом которых можно выбрать наиболее целесообразную конструкцию распылителя для конкретных условий его работы. По конструктивному выполнению основных элементов эти устройства можно разделить на следующие классы.

Струйные форсунки являются наиболее простыми в конструктивном оформлении и представляют собой цилиндрическую трубку, из которой под давлением вытекает струя жидкости, распадающаяся на капли и образующая факел с малым углом при вершине.

В центробежных форсунках движущаяся под давлением жидкость закручивается в завихрителе с тангенциально расположенными каналами (ось каналов перпендикулярна или размещена под углом к оси форсунки, но не пересекается с ней) и за счет создаваемого интенсивного вращательного движения в камере поступает в сопло, на выходе из которого распадается на мелкие капли, приобретая форму полого конуса. Для образования такого факела жидкость в форсунку подводится под давлением. Диапазон изменения давления зависит, главным образом, от требуемой дисперсности распыла, физических свойств жидкости и размеров дозирующих элементов. Вследствие высокого давления жидкости на входе в центробежную форсунку размеры её сопла и тангенциальных каналов обычно находятся в пределах от 0,5 до 3 мм. Форсунки широко применяются для распыления однородных маловязких жидкостей. Разновидностью центробежных форсунок являются шнековые форсунки. Отличительный признак этих форсунок состоит в том, что закручивание жидкости производится с помощью завихрителя, выполненного в форме шнека, на поверхности которого расположены винтовые каналы.

Пневматические форсунки отличаются тем, что жидкость в них дробится под воздействием подаваемого под давлением воздуха или газа. Эти форсунки условно можно разделить на две группы: низкого и высокого давления. К первой группе относятся форсунки с избыточным давлением распыляющего агента до 10 кПа, ко второй от 100 до 1000 кПа и более. Пневматические форсунки широко используются для распыления вязких жидкостей и растворов. Их применение особенно целесообразно, если в растворе содержатся твердые частицы. Большие размеры проходных сечений каналов форсунки значительно снижают вероятность их засорения.

В ультразвуковых форсунках струя или пленка жидкости, вытекающая из отверстия или щели, дробится под воздействием ультразвуковых колебаний воздуха, создаваемых генератором, или под действием быстрых вертикальных перемещений пластинки, происходящих с ультразвуковой частотой. Форсунки обеспечивают хорошую дисперсность распыления жидкости, достигающую в некоторых конструкциях 10…15 мкм. Однако эти форсунки, как правило, используются в технологических процессах с небольшими расходами жидкости, от 40 до 80 кг/ч.

В центробежных распылительных механизмах пленка жидкости, создаваемая при вращении диска, стекает с его кромок и, становясь неустойчивой, распадается на капли. В настоящее время определены основные схемы механизмов, для которых четко просматривается тенденция использования больших частот вращения диска от 200 до 300 1/с, при окружных скоростях диска от 90 до 150 м/с.

Известно [2], что распад струи, вытекающей из распылителя, связан с развитием в ней нестационарных колебаний, прогрессирующих вследствие нарушения равновесной формы свободной поверхности струи. Установлено, что существует два типа разрушения струй. По первому типу в результате действия сил инерции и поверхностного натяжения струя расширяется. Возникают турбулентные возмущения, скорость роста которых не зависит от скорости истечения [20]. Этот режим характерен для невысоких скоростей жидкости. При увеличении скорости истечения возникают возмущения второго типа: струя становится синусоидальной.

Дробление для первого режима течения определяется силами поверхностного натяжения, а для второго – сопротивлением воздуха движению гребней волн. Существует критическая скорость, при которой скорость синусоидальных возмущений растет с той же скоростью, что и расширение, поэтому при скоростях истечения, более высоких, чем критические, синусоидальные возмущения разрушают струю раньше, и длина непрерывного участка с увеличением скорости сокращается.

В работе [2] приведены фотографии факелов, вытекающих из центробежных форсунок. Показано влияние давления и физических свойств жидкости (вязкости и поверхностного натяжения) на форму распадающейся струи жидкости. Фотографии позволяют рассмотреть факел распыла воды при различных давлениях. При малой величине избыточного давления (от 40 до 50 кПа) скорость истечения мала и под действием сил тяжести и поверхностного натяжения образуется «пузырь», по периферии которого заметны многочисленные складки. При незначительном увеличении давления (до 70 кПа) «пузырь» превращается в пустотелый конус с углом при вершине, равным 90°. Опыты показали, что величина этого угла сохраняется в широком диапазоне изменения давлений. Из периферийных складок на плёнке жидкости образуются нити и шнуры, которые затем распадаются на отдельные капли. При дальнейшем росте давления (до 200 кПа) скорость истечения возрастает, струя становится турбулентной и механизм распада изменяется. Две серии волн, действующих под прямым углом друг к другу, образуют слой жидкости, характеризующийся высокой турбулентностью. Вследствие радиальных пульсаций скорости поверхность турбулентной струи становится неровной и распад плёнки начинается на меньшем расстоянии от сопла форсунки. При увеличении давления   
до 700 кПа двойные волны ещё заметны, однако доминирующими   
в процессе распада струи распыляемой жидкости становятся периферийные волны. С увеличением вязкости жидкости продольные волны исчезают. При росте избыточного давления до 700 кПа турбулентность уменьшается, что вызывает задержку распада плёнки распыляемой жидкости. При дальнейшем увеличении вязкости жидкости и том же избыточном давлении факел теряет гладкую коническую форму. Таким образом, при распылении жидкостей сравнительно малой вязкости образуется плёнка с высокой турбулентностью. С увеличением вязкости при одновременном повышении давления турбулентность уменьшается и плёнка разрывается на большем удалении от сопла форсунки.

Поверхностное натяжение также влияет на дисперсность распыляемой жидкости. При распылении жидкости, имеющей низкие значения поверхностного натяжения, например воды, происходит быстрый распад струи, образующаяся плёнка имеет повышенную тенденцию к образованию на своих краях «шнуров», которые распадаются на капли. С увеличением поверхностного натяжения наблюдается общее замедление распада струи распыляемой жидкости. Заметное влияние на дисперсность оказывают также толщина плёнки жидкости, скорость её движения, плотность и вязкость окружающей (рабочей) среды.

Особенности распыления и дробления капель в устройствах с вращающимся распылителем связаны с тем, что при стекании с кромок вращающегося диска плёнка жидкости становится неустойчивой и распадается на капли. Дроблению жидкости на капли в центробежных вращающихся устройствах посвящен ряд работ [21], в которых отмечается образование краевого утолщения на наружной кромке диска. Жидкость не стекает с диска до тех пор, пока силы инерции не преодолеют равновесия между центробежной силой и силой тяжести. Формула для определения диаметра краевого утолщения рассмотрена в работе [22].

Установлено три режима дробления жидкости на капли: отрыв капель непосредственно с краевого утолщения, распад струи и разрушение плёнки. Когда силы инерции нарушают равновесие, излишки жидкости выбрасываются из краевого утолщения в виде капель. Каждая капля увлекает за собой из утолщения струйку жидкости и при небольшой вязкости (кинематическая вязкость  < 3·10-6 м2/с) отделяется вблизи кромки диска. Оставшаяся струйка под действием сил   
поверхностного натяжения возвращается в краевое утолщение, пока новые порции поступающей жидкости не вызовут повторения описанного процесса. Капли, образованные по этому механизму, называются первичными каплями.

С увеличением вязкости  > 5·10-6 м2/с струйки жидкости становятся достаточно стабильными и при разрушении не возвращаются в краевое утолщение. При этом образуются вторичные капли, более мелкие, чем первичные. Этот же режим может быть результатом не только увеличения вязкости, но и некоторого увеличения производительности. Последующее увеличение производительности может привести к срыву жидкости с диска в виде плёнки, которая затем разрушается с образованием совокупности неоднородных по размеру капель. При отсутствии дополнительных эффектов типа ударных и колебательных возмущений можно определить ту критическую производительность, после увеличения которой, формирование капель приобретает нестабильный, неустойчивый характер. Исследования механизма пленочного дробления вязких жидкостей и анализ распределения размеров капель приведены в работе [23]. Физическая картина дробления жидкости на лопастных и сопловых дисках, наиболее широко применяемых на практике, аналогична случаю применения гладких дисков.

Рассматривая вопросы распыления, нельзя не сказать о процессе коалесценции капель жидкости. За пределами распылителя из-за неоднородности скоростей частиц различного диаметра, их поперечных перемещений под воздействием собственного вращательного движения и турбулентных пульсаций происходят соударения частиц. В зависимости от действия этих факторов возможно слияние частиц между собой или дробление неустойчивых капель. Среди немногочисленных исследований по данному вопросу можно отметить работу [24], в которой различают два механизма слияния капель: за счет различия скоростей крупных и мелких капель (ортокинетическая коагуляция) и под действием пульсационного движения (турбулентная коагуляция). В работе показано, что увеличение объемной концентрации капель с 3,7·10-4 до 8,1·10-4 приводит к заметному снижению дисперсности частиц. Установлено также, что силы конвективных течений между каплями примерно в два раза сокращают силы отталкивания капель. Анализ ряда исследований по механическому взаимодействию частиц между собой [25] позволил сделать вывод о том, что если объемная концентрация частиц в газе не превышает значений 5·10-3…10-2 м3/м3, то взаимодействием частиц между собой можно пренебречь.

Представляет интерес характер изменения расхода жидкости через центробежную форсунку и формы факела с изменением температуры жидкости. С увеличением температуры сначала происходит медленное сокращение массового расхода, связанное с уменьшением вязкости и плотности. Затем, после достижения некоторой температуры, начинается резкое уменьшение расхода через форсунку до тех пор,   
пока через неё не пойдет только пар. Такое резкое уменьшение расхода вызвано закипанием жидкости в форсунке. При работе центробежной форсунки с кипящей жидкостью её факел с увеличением содержания пара значительно изменяет форму.

В закрытых центробежных форсунках с увеличением интенсивности образования паров жидкости значительно увеличивается давление в ядре потока камеры закручивания и по оси форсунки [2]. Дальнейшее увеличение содержания пара вызывает резкое уменьшение давления пара в центре камеры закручивания, которое становится даже ниже давления среды, в которую происходит истечение жидкости. В отдельных случаях, например, при сушке термостойких растворов, может оказаться целесообразным распыление их под большим давлением и при значительном перегреве. Для рассматриваемых условий, как показано в работах [4, 26, 27], выгодно применять струйные форсунки. В этих же работах приведены основные закономерности распыления и распределения жидкости в факеле распылителя.

Особенностью таких форсунок является короткое цилиндрическое сопло, длина которого не превышает двух его диаметров, и конусный вход и выход. Исследования, рассмотренные в работе [26], проведены с форсунками, которые имели диаметры сопел от 0,3 до 0,8 мм, углы входа в сопло от 20 до 90° и выхода из него от 30 до 150°. Жидкость подавалась под давлением от 1,2 до 1,5 МПа. Процесс образования пара из перегретого раствора происходил после его выхода из сопла. Угол факела распыленной жидкости достигал 40°. Наибольшая плотность орошения в факеле наибольшая наблюдалась по оси форсунки. По мере удаления от форсунки плотность орошения по сечению выравнивается. С ростом температуры раствора происходит некоторое уменьшение интенсивности орошения в центре факела.

**1.4 Влияние конструктивных факторов на работу**

**центробежных форсунок**

Выбранная схема форсунки должна обеспечивать заданную дисперсность жидкой среды при минимальном давлении на входе в форсунку. Это возможно в том случае [2], если в камере закручивания, сопловом отверстии и тангенциальных каналах форсунки трение будет минимальным. Для уменьшения трения тангенциальные каналы должны быть предельно короткими, а число их сведено до минимума.

Обычно допускают длину тангенциального канала, составляющую от одного до двух его диаметров. Меньшая длина не обеспечивает осевое направление движения жидкости в канале. Если требуется   
равномерное распределение распыленной жидкости, то число тангенциальных каналов должно быть не меньше двух-трех. Причем больше трех тангенциальных каналов рекомендуется делать только в том случае, когда их диаметр превышает разность значений радиуса камеры закручивания и сопла. Если диаметр тангенциального канала существенно превышает радиус камеры закручивания, то возникают значительные потери энергии в результате гидравлического удара при смешивании жидкости, поступающей из тангенциальных каналов, и жидкости, вращающейся в камере закручивания. Если диаметр тангенциа-льного канала мал в сравнении с диаметром камеры закручивания, то вследствие малой разности скоростей смешивающихся струй потери энергии от гидравлического удара будут невелики.

В предварительных расчетах можно принимать коэффициент расхода тангенциальных каналов равный 0,68. Оси тангенциальных каналов расположены относительно оси форсунки обычно под углом 90°. В большинстве случаев изготавливают центробежные форсунки, которые обеспечивают угол факела распыленной среды от 80 до 90°. Они рассчитаны на то, чтобы обеспечить минимальное трение. Однако вследствие сложности изготовления проточной части форсунок малых размеров не всегда возможно соблюсти требуемые геометрические соотношения.

Важный момент для совершенствования конструкций форсунок, кроме разработки методики расчета основных технологических и конструктивных параметров их, заключается в возможности изготовления основных элементов распылителя с минимальными допусками. Вопрос о технологии изготовления форсунок приобрел особое значение в настоящее время, когда во многих отраслях народного хозяйства используются агрегаты большой производительности, в которых устанавливается несколько форсунок. В этом случае предъявляются повышенные требования к точности совпадения расходных характеристик каждой из них. Конечно, невозможно изготовить комплект форсунок, которые имели бы совершенно одинаковые характеристики по расходу жидкости. Однако исходя из требуемой точности совпадения расходных характеристик отдельных форсунок можно найти, с какими допусками должны быть выполнены размеры распылителя, чтобы удовлетворить поставленным требованиям.

Для форсунки любого типа важно знать допуски не только на основные элементы, обеспечивающие взаимозаменяемость, но и на возможный их износ при эксплуатации. Поэтому, прежде всего, нужно найти зависимости отклонения расхода жидкости от точности выполнения основных геометрических размеров деталей распылителя.   
Расход жидкости, в свою очередь, влияет на размеры капель жидкости и их распределение. Из рассмотрения форсунок разных типов видно [5], что наибольшая точность должна выдерживаться при выполнении форсунок центробежного типа. Для количественной оценки влияния конструктивных параметров и точности выполнения углов центробежных форсунок на изменение расхода жидкости используется метод малых отклонений.

Достижение стабильности характеристик форсунок связано с условиями их эксплуатации. Несмотря на фильтрование жидкости, механические примеси всё же попадают в трубопровод, в том числе и в распылитель, вызывая его интенсивный износ. При этом изменяются геометрические размеры каналов форсунки, нарушается нормальная её работа и уменьшается срок эксплуатации. Абразивный износ внутренних поверхностей, особенно стенок сопла, приводит к изменению формы факела, увеличению расхода жидкости и укрупнению капель. Скорость износа определяется степенью загрязненности жидкости механическими примесями, их составом, а также давлением жидкости. Для повышения надежности работы форсунок необходимо соблюдать требования инструкции по их эксплуатации. Все форсунки время от времени необходимо разбирать для чистки и проверки. Подготовленные к эксплуатации форсунки рекомендуется проверять на стенде. Особое внимание обращается на отсутствие течи жидкости из соединений, достижение необходимой производительности, требуемой величины угла факела, качества распыления и симметрии факела.

**1.5 Измерение скорости капель и газовой среды   
при распылении**

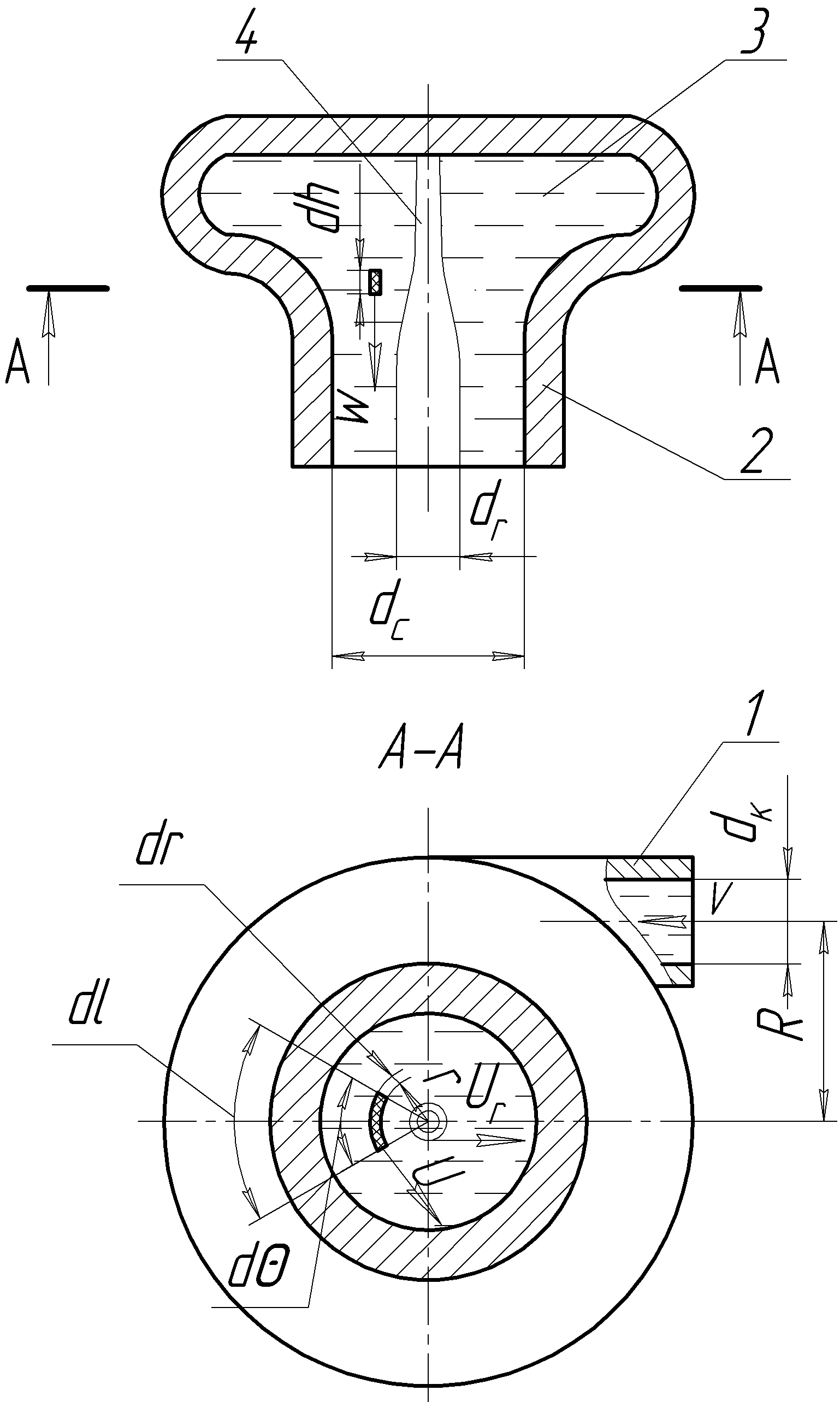
Для определения скорости капель наиболее часто используется метод скоростной киносъемки. Для этих целей широкое применение находят серийно выпускаемые кинокамеры, работающие с частотой кадров 1500 с-1. Известны также методы радиоизотопного определения скорости частиц [28] и [29], метод светового трассирования и некоторые другие. Предложен способ определения средней скорости совокупности частиц, основанный на использовании подвижной ловушки [30]. При малых значениях плотности и скорости капель, площади поперечного сечения ловушки высота перемещений ловушки может оказаться соизмеримой с высотой аппарата, что неприемлемо. В таких случаях рекомендуется осуществлять многократное возвратно-поступательное движение ловушки. При этом, когда ловушка движется навстречу частицам, она открыта, а когда возвращается в исходное положение – закрыта. Для успешной реализации этого способа необходимо обеспечить быстродействие заслонки и небольшую перемещаемую массу, при которой инерционность системы и динамические   
перегрузки в приводном узле будут невелики. Поскольку ловушка перемещается в объеме аппарата, выбор её габаритов и скоростей определяется условиями, при которых исключается отклонение траектории капель от своего истинного направления. Погрешность при определении средней скорости частиц составляет от 10 до 15 %.

Измерение скорости газовых потоков, несущих взвешенные частицы, требует использования датчиков, защищенных от попадания частиц в контролируемую среду. Применительно к исследованиям зоны факела распыления задача измерения осложняется значительным диапазоном скоростей – от десятков метров в секунду до десятых и сотых долей метров в секунду. Если концентрация частиц в газовой среде мала, используют традиционные средства измерений гомогенных газовых потоков. В этом случае достаточна периодическая продувка датчика чистым воздухом. Способы механической сепарации частиц вызывают искажение скоростей в измеряемой зоне. Перспективен метод электростатической защиты датчика, при котором электростатическое поле отклоняет траектории частиц, незначительно воздействуя на газовую фазу. Известен метод флюоресцентного трассирования [31], применимый при остаточном давлении в аппарате от 0,95 до 1,36 кПа.

В настоящее время не существует достаточно надежных универсальных устройств, которые можно было бы рекомендовать в качестве измерителей скорости газа в присутствии капель жидкости [32, 33]. Указанные экспериментальные задачи обычно решаются в каждом частном случае исследователями самостоятельно в зависимости от свойств, размеров и концентрации диспергированных частиц, а также от свойств и условий движения газовой фазы.

# 2 РАСЧЁТ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ

Рассмотрим схему центробежной форсунки, которая представлена на рисунке 1. Жидкость по тангенциальному каналу 1 (каналам), ось которого смещена относительно оси сопла 2, подаётся в камеру закручивания 3, где приобретает интенсивное вращательное движение и поступает в сопло. Внутри форсунки образуется газовый, воздушный вихрь 4, расположенный вдоль оси сопла. При выходе из сопла жидкость распадается на капли, образуя факел из капель жидкости. Считаем центробежную форсунку идеальной.



1 – тангенциальный канал; 2 – сопло; 3 – камера закручивания; 4 – вихрь

Рисунок 1 – Схема центробежной форсунки

Идеальной называют центробежную форсунку с плавным (безотрывным) входом потока в цилиндрическое сопло; жидкость при этом используется также идеальная (несжимаемая, лишённая вязкости). Для течения идеальной жидкости справедливы законы сохранения момента количества движения и механической энергии [34]. Момент количества движения жидкости относительно оси сопла сохраняет постоянное значение, равное начальному моменту на входе в камеру закручивания, и находится из уравнения

, (1)



где  – тангенциальная составляющая скорости жидкости, м/с;

– текущий радиус, м;



– скорость жидкости в тангенциальном канале, м/с;



– расстояние от оси сопла до оси тангенциального канала, м.



Полное избыточное давление  для двигающейся внутри форсунки жидкости, если пренебречь разностью рассматриваемых уровней, согласно уравнению Бернулли, равно

, (2)



где – избыточное статическое давление в потоке, Па;



– плотность жидкости, кг/м3;



 – осевая составляющая скорости жидкости, м/с.

Течение жидкости происходит через кольцевое сечение, внутренний радиус которого равен радиусу газового вихря , внешний радиус равен радиусу сопла . Площадь поперечного сечения слоя жидкости в форсунке равна

(3)



или

, (4)



где  – радиус газового вихря, , м;

 – внутренний радиус отверстия сопла,  (см. рису-нок 1), м;

 – коэффициент заполнения поперечного сечения сопла форсунки жидкостью.

. (5)



Найдем распределение давления по поперечному сечению   
форсунки. Выделим элемент жидкости на радиусе  толщиной , высотой, равной , и длиной . Длина  может быть найдена из уравнения

, (6)



где  – угол, рад.

Разность сил давления на боковых поверхностях элемента жидкости уравновешивает центробежную силу. Условие равновесия элемента жидкости запишется в виде

, (7)



где  – масса элемента жидкости, кг.

Масса элемента  равна

. (8)



По закону сохранения момента количества движения

, (9)

где  – тангенциальная составляющая скорости жидкости на радиусе , м/с.

Решая совместно уравнения (7), (8) и (9) относительно , получим

. (10)

Интегрируя уравнение (10) с граничным условием, при ,

, (11)

получим

. (12)

Решив совместно уравнения (12) и (9), имеем

. (13)

Подставив выражение (13) в уравнение (2) и решив относительно , получим уравнение для определения осевой скорости жидкости

. (14)

Средняя скорость  жидкости в тангенциальном канале определяется из следующего уравнения

, (15)

где  – объёмный расход жидкости, м3/с;

 – число входных каналов;

 – радиус входного канала,  (см. рисунок 1), м.

Запишем уравнение закона сохранения момента количества движения в виде:

. (16)

Подставим выражение для скорости  из уравнения (15) в уравнение (16) и найдём скорость 

. (17)

Решив совместно уравнения (14) и (17), получим

. (18)

Также величину скорости  можно определить по следующей формуле

. (19)

Приравнивая выражения (18) и (19) и решая относительно  с учётом уравнения (5), находим

, (20)

где  – коэффициент расхода форсунки,

; (21)

где  – геометрическая характеристика форсунки,

. (22)

Найдем коэффициент  заполнения отверстия сопла форсунки жидкостью, соответствующий максимальному коэффициенту расхода . Продифференцировав выражение (21) по  и полагая , имеем

. (23)

Следовательно,

. (24)

Из уравнения (24) выразим 

. (25)

Подставив полученное выражение в формулу (21), получим

. (26)



Преобразуем выражение (25) в кубическое уравнение

. (27)

Найдём корни уравнения (27), используя решение Кардано [35], подстановкой

, (28)

где  – корень уравнения.

Уравнение (27) приводим к неполному виду

, (29)



где ,  – коэффициенты уравнения,

, (30)

. (31)

Корни ,  и  уравнения (29) находятся из выражений

, (32)



, (33)

где

;

.

Для решения данной задачи следует брать только действительные значения корней, получаемые при  ≥ 0.

Если  < 0, то применяется тригонометрическое решение. В этом случае

,

,

где

.



Для определения теоретического коэффициента расхода центробежной форсунки используется блок-схема последовательности расчёта, представленная на рисунке 2.

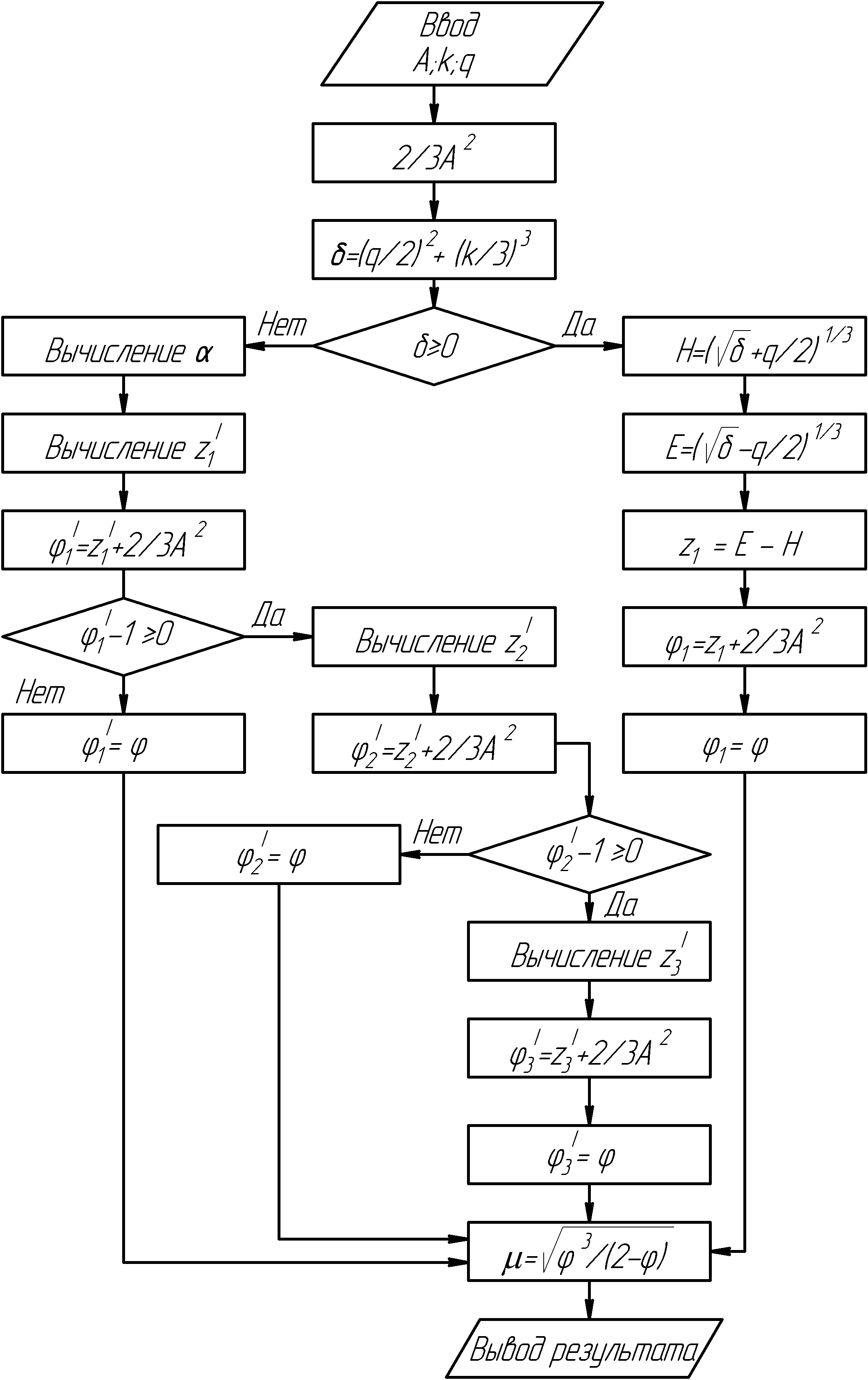
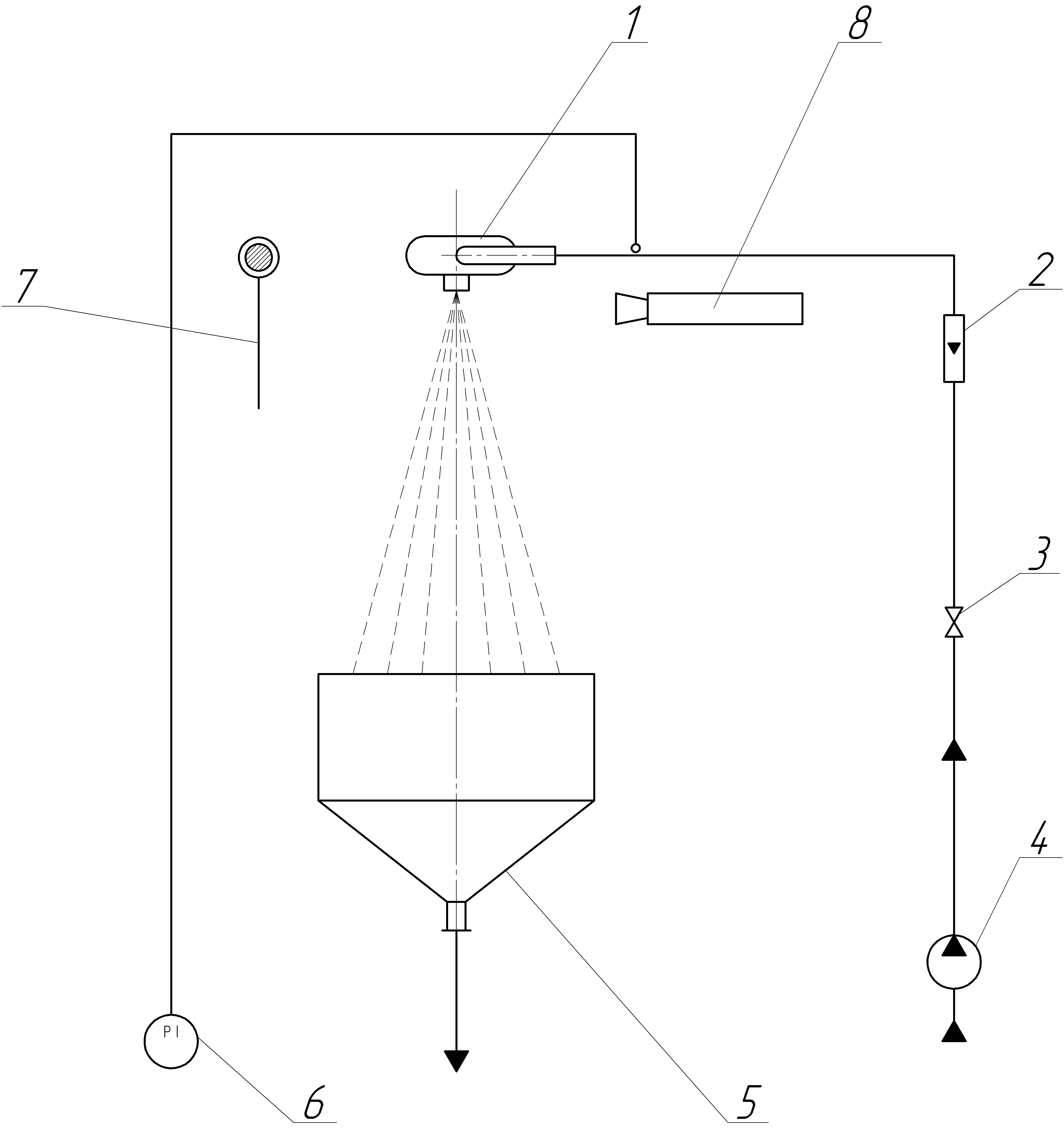


Рисунок 2 – Блок-схема программы расчёта параметров форсунки

Используя исходные данные, в виде значений геометрических параметров форсунки и определив коэффициенты , , и , находят коэффициент  заполнения отверстия сопла форсунки жидкостью и далее по уравнению (26) определяют коэффициент  расхода жидкости через форсунку.

# 3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 3 показана схема установки для экспериментального определения коэффициента расхода центробежной форсунки и параметров процесса распыления. Установка состоит из форсунки 1, ротаметра 2, вентиля 3, центробежного насоса 4, ёмкости 5, манометра 6, экрана 7 и осветителя 8.



1 – форсунка; 2 – ротаметр; 3 – вентиль; 4 – насос; 5 – ёмкость;   
6 – манометр; 7 – экран; 8 – осветитель

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Вода или другая используемая для исследований жидкость насосом 4 подаётся в центробежную форсунку 1, из которой жидкость вытекает в виде факела, состоящего из капель. Капли падают в ёмкость 5, где объединяются в сплошную фазу, которая может вновь подаваться насосом в форсунку. Вентиль 3 предназначен для изменения расхода жидкости. Расход жидкости, поступающей в форсунку, контролируется ротаметром 2. Давление в трубопроводе определяется манометром 6. Осветитель 8 предназначен для проецирования факела жидкости на экран 7 и определения угла распыла форсунки. Осветитель 8 обеспечивает теневое проецирование различных предметов и явлений. Методом теневого проецирования возможно проводить демонстрацию волн на воде, вращательных и колебательных движений, конвекции воздуха и т. д. Кроме того, осветитель можно использовать для подсветки рассматриваемых микрообъектов при работе с микроскопом.

Осветитель состоит из полого корпуса прямоугольного сечения, в передней части которого расположена оправа с линзой. Внутри корпуса расположен стержень с патроном и лампочкой на одном конце и ограничительной втулкой на другом. После юстировки стержень фиксируется в нужном положении винтом. Скоба со стержнем служит для закрепления осветителя в нужном положении и устанавливается в специальном отверстии на корпусе блока питания или отдельно в крестообразной муфте на штативе.

Блок питания содержит пластмассовый корпус, внутри которого на металлическом основании установлены понижающий трансформатор, втулка для стержня с осветителем. Понижающий трансформатор включается в осветительную сеть переменного тока 220 В и предназначен для питания лампочки А6-21. На задней стенке корпуса блока питания размещены два универсальных зажима для подключения осветителя к вторичной обмотке трансформатора и зажимной винт, фиксирующий положение стержня осветителя по высоте, а на передней стенке установлен кнопочный выключатель.

Диафрагмы предназначены для ограничения светового потока осветителя, для чего их помещают в специальный паз в оправе. Подобное ограничение светового потока особенно необходимо при освещении микрообъектов, находящихся на предметном столике микроскопа.   
Каждая из трех диафрагм имеет соответственно одно отверстие диаметром 5, 10 и 15 мм. Кроме трех диафрагм с круглым отверстием, в набор входит диафрагма со щелью-стрелкой.

Светофильтр синего цвета, установленный в оправе осветителя, служит для монохроматического освещения предметного столика микроскопа. Светофильтр представляет собой стеклянную пластину размером 50 x 50 мм. Матовое стекло, так же как и светофильтр, устанавливается на пути светового потока осветителя и позволяет получить ровный рассеянный свет. Размеры матового стекла те же, что и светофильтра. Источник света – автомобильная лампа напряжением 6 В. Не являясь точечным источником света, лампа не позволяет качественно пользоваться диафрагмой со стреловидной щелью, в результате чего стрелка проецируется на экране двойным изображением.

Технические данные осветителя ОТП

Напряжение питания – переменное………………….220 В

Освещенность экрана в центре поля,

установленного на расстоянии 1 м не менее………..20 лк

Время непрерывной работы не более………….…….45 мин

Максимальный угол наклона в вертикальной

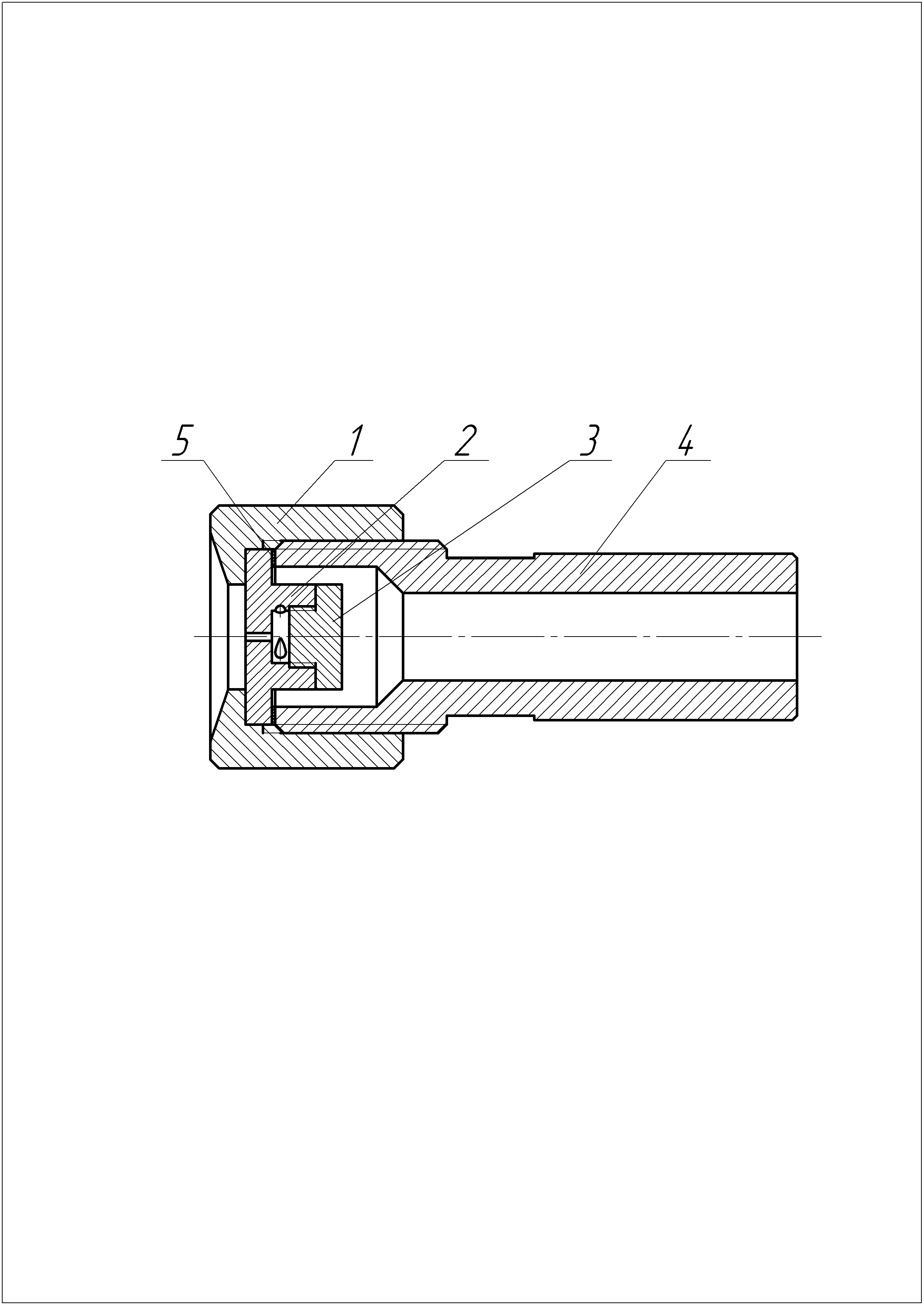
плоскости………………………………………………45°

Габаритные размеры осветителя не более……….…. 295 x 195 x 120 мм

Масса осветителя не более…………………….……...3,7 кг

На рисунке 4 представлена схема центробежной форсунки, используемой для исследований. Форсунка состоит из следующих деталей: гайки 1, сопла 2, втулки 3, корпуса 4 и прокладки 5. Внутри корпуса 4 расположено сопло 2, закрытое с одной стороны втулкой 3 и зафиксированное гайкой 1. Между выступом сопла 2 и корпусом 4 устанавливается прокладка, препятствующая проходу жидкой среды в резьбовое соединение между гайкой и корпусом. Сопло 2 содержит осевой канал для вывода жидкости и тангенциальные каналы для ввода жидкости, а также резьбовое отверстие для ввинчивания втулки 3. Сопла сменные, изготовлены с различными диаметрами каналов.

Работа на экспериментальной установке проводится по следующей методике. Ёмкость 5 (см. рисунок 3) заполняется жидкостью в   
заданном количестве, включается насос 4, открывается вентиль 3 и устанавливается некоторый объёмный расход  жидкости, величина   
которого контролируется с помощью ротаметра 2. После выхода на   
установившийся режим по манометру 6 определяется гидравлическое сопротивление  форсунки. Затем устанавливается следующая   
величина объёмного расхода  жидкости и определяется соответствующее значение величины . Таким же образом далее проводится не менее 5–6 опытов при различных значениях расхода жидкости, поступающей в форсунку.



1 – гайка; 2 – сопло; 3 – втулка; 4 – корпус; 5 – прокладка

Рисунок 4 – Схема экспериментальной центробежной форсунки

Перед включением осветителя 8 в сеть необходимо установить осветитель в скобе стержня, вставить его в отверстие на корпусе блока питания и закрепить винтом на требуемой высоте. Провода осветителя подключаются к универсальным зажимам блока питания, на которые подается напряжение с вторичной обмотки трансформатора, а вилка шнура блока питания включается в сеть. Юстировка лампы осуществляется перемещением стержня вдоль оси. Положение лампы определяется необходимыми размерами светового пятна осветителя на экране. При движении источника света в сторону оправы с линзой диаметр светового пятна будет увеличиваться.

Для определения угла  распыла форсунки включается лампа осветителя 8, и факел распыленной жидкости проецируется на прозрачный экран 7. По полученному на экране изображению находится угол  путём измерения угла при вершине конуса прозрачным транспортиром. Попутно экспериментально определяется размер капель жидкости в факеле распыленной жидкости с помощью фотосъёмки.

# 4 ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Связь величин , ,  и  c экспериментальным значением коэффициента расхода  по аналогии с теоретическим уравнением (20) определяется по следующей формуле

. (34)

Следовательно,

. (35)

Относительное отклонение  теоретического значения величины коэффициента  от экспериментального  определяется по формуле

. (36)

Исходные, теоретические и экспериментальные величины заносятся в таблицу 1.

Таблица 1 – Исходные, теоретические и экспериментальные величины

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | , м3/с | , Па |  |  |  | , град | , м |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

Отчёт о выполненном исследовании содержит:

– титульный лист;

– цель работы;

– назначение и принцип работы центробежной форсунки;

– основные расчётные уравнения и результаты расчёта параметров форсунки;

– схему установки и её описание;

– расчётную блок-схему;

– таблицы с исходными, расчётными и экспериментальными данными;

– графики зависимостей: , , , , , ;



– выводы.

# 5 ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

К проведению экспериментальной работы студенты допускаются только после собеседования с преподавателем, в ходе которого студент должен продемонстрировать знание положений инструкции по технике безопасности к предстоящей конкретной работе; знание цели работы, методики её выполнения; твёрдые знания назначения, принципа действия и особенностей конструкции центробежной форсунки, оборудования и приборов, используемых при выполнении работы.

Перед началом экспериментального исследования каждый студент должен убедиться в исправности оборудования, приборов, электрической проводки, заземлений, соединений трубопроводов, инструмента, необходимого для выполнения работы. При обнаружении неисправности студент обязан немедленно сообщить об этом преподавателю. Работать, используя неисправное оборудование, категорически   
запрещается.

Основными возможными источниками опасности в лаборатории являются переменный электрический ток промышленной частоты напряжением 380 В, движущиеся элементы используемого оборудования и рабочие среды, находящиеся под давлением в трубопроводах.

Во избежание поражения электрическим током все работающие в лаборатории обязаны строго соблюдать правила техники безопасности [36]. Запрещается подключение приборов и оборудования к электросети без разрешения преподавателя или лаборанта.

Студентам категорически запрещается вскрывать распределительные щиты, коробки, панели, силовые шкафы, предохранительные устройства и проводить какие-либо работы в них; запрещается пользоваться общим выключателем на распределительном щите с целью подачи напряжения. Тем не менее студенты должны знать, как отключить напряжение на центральном щите в случае аварийной обстановки или при несчастном случае.

При включении осветителя нужно помнить, что применяемый электрический ток переменного напряжения 220 В опасен для жизни, поэтому при эксплуатации осветителя необходимо выполнять следующие требования техники безопасности. Студент, выполняющий лабораторную работу с использованием осветителя, должен изучить   
данные методические рекомендации. Ответственным за исправность действующего осветителя во время демонстрации его работы является преподаватель или лаборант. Перед началом демонстрации осветитель должен быть заземлен в соответствии с правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. В процессе эксплуатации запрещается разбирать блок питания и касаться его токоведущих частей. Ремонт осветителя, замену лампы и чистку осветителя следует производить при отключенном от электрической сети блоке питания. Запрещается включать осветитель в электрическую сеть постоянного тока.

При выполнении лабораторной работы категорически запрещается располагать на рабочем месте посторонние предметы (неиспользуемый инструмент, сумки, одежду, телефоны и т.п.). По окончании лабораторной работы студенты должны отключить установку от электрической и водопроводной сети, привести в порядок рабочее место.

# Литература

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2005. – 753 с.
2. Пажи, Д.Г. Распыливающие устройства в химической промышленности / Д.Г. Пажи, А.А. Корягин, Э.А. Ламм. – М.: Химия, 1975. – 199 с.
3. Бородин, В.А. Распыливание жидкостей / В.А. Бородин. – М.: Машиностроение, 1967.
4. Лыков, М.В. Распылительные сушилки / М.В. Лыков, Б.И. Леончик. – М.: Машиностроение, 1966. – 336 с.
5. Пажи, Д.Г. Распылители жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
6. Hanson, A. / A. Hanson. The Physics of Fluids. – 1963. – V. 6. – № 8. – P. 42.
7. Русанов, А.А. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике / А.А. Русанов, И.И. Урбах, А.П. Анастасиади. – М.: Энергия, 1969. – 456 c.
8. Карабин, А.И. Сжигание жидкого топлива в промышленных установках / А.И. Карабин. – М.: Металлургия, 1966.
9. Салимов, А.У. / А.У. Салимов. – Изв. АН СССР. – 1971. – № 3. – С. 11.
10. Соу, С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – 536 c.
11. Бондарюк, М.М. Теория и расчёт прямоточных камер сгорания / М.М. Бондарюк, С.М. Ильяшенко, А.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1964. – 306 с.
12. Фридман, В.М. Ультразвуковая химическая аппаратура / В.М. Фридман. – М.: Машиностроение, 1967. – 211 с.
13. Экнодносянц, О.К. Физические основы ультразвуковой технологии / О.К. Экнодносянц. – М.: Наука, 1970.
14. Кулагин, Л.В. Форсунки для распыливания тяжёлых топлив / Л.В. Кулагин, М.Я. Морошкин. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
15. Пашковский, Б.С. Эффективность применения акустических колебаний в процессах распыливания жидких топлив / Б.С. Пашковский. – Теплоэнергетика. – 1974. – № 10. – С. 28.
16. Лышевский, А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях / А.С. Лышевский. – Л.: Судостроение, 1971. – 248 с.
17. Исаев, А.П. Гидравлика дождевальных машин / А.П. Исаев. – М.: Машиностроение, 1973. – 215 с.
18. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин. – М.: Машиностроение, 1969. – 547 с.
19. Хавкин, Ю.И. Центробежные форсунки / Ю.И. Хавкин. – М.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
20. Ричардсон, Э. Динамика реальных жидкостей / Э. Ричардсон. – М.: Мир, 1965. – 328 с.
21. Masters, K. / K. Masters, M.F. Montady. – Brit. Chem. Eng. – 1968. – V. 13. – № 2. – P. 242–244.
22. Hege, H. / H. Hege. – Chem. Eng. Techn. – 1964. – V. 36. – № 1. – P. 52–59.
23. Чечик, О.С. О расчёте диаметра капель распыла / О.С. Чечик, Б.М. Люминарский. – ЖПХ. – 1972. – Т. 45. – № 4. – С. 895–896.
24. Дунский, В.Ф. / В.Ф. Дунский. – ЖТФ. – 1956. – Т. 26. – № 6. – С. 1262–1268.
25. Горбис, З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков / З.Р. Горбис. – М.: Энергия, 1970. – 423 с.
26. Лебедев, П.Д. Тепло- и массоперенос / П.Д. Лебедев, Б.И. Леончик. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 304 с.
27. Кондуков, Н.В. Исследование параметров движения частиц в псевдоожиженном слое методом радиоактивных изотопов / Н.Б. Кондуков [и др.]. – ИФЖ. – 1963. – Т. 6. – № 7. – С. 13–18.
28. Аэров, М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и подвижным кипящим слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 256 с.
29. Леончик, Б.И. Измерение в дисперсных потоках / Б.И. Леончик, В.П. Маякин. – М.: Энергия, 1971. – 248 с.
30. Витман, Л.А. Распыливание жидкости форсунками / Л.А. Вит-ман, Б.Д. Кацнельсон, Н.И. Панеев. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.
31. Пажи, Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей /   
    Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 254 с.
32. Дитякин, Ю.Ф. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1977. – 207 с.
33. Сергеев, А.Г. Определение коэффициента расхода центробежной форсунки: методические указания к лабораторной работе / А.Г. Сергеев, Г.В. Леонов. – Барнаул: АлтПИ, 1987. – 23 с.
34. Корн, Г. Справочник по математике: для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 831 с.
35. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. 4-е изд. пер. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 431 с.

**СОДЕРЖАНИЕ**

|  |  |
| --- | --- |
| ВВЕДЕНИЕ……………………………………………………………. 1 РАСПЫЛЕНИЕ ЖИДКИХ СРЕД ФОРСУНКАМИ………………  1.1 Особенности способов распыления жидких сред………...  1.2 Способы распыления жидкостей…………………………..  1.3 Конструкции распылителей………………………………...  1.4 Влияние конструктивных факторов на работу  центробежных форсунок………………………………………..  1.5 Измерение скорости капель и газовой среды при  распылении……………………………………………………… 2 РАСЧЁТ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАСХОДА ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ……………………………………..3 ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ………………….4 ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ……………………………..5 ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ……………………….. Литература……………………………………………………………. | 3  4  4  5  9  14  16  17  24  29  30  32 |
|  |  |

*Учебное издание*

Светлов Сергей Алексеевич

**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ**

Методические рекомендации к лабораторной работе для студентов специальностей «Автоматизированное производство химических предприятий» (240706) и «Машины и аппараты пищевых производств» (260601)

Редактор Идт Л.И.

Корректор Малыгина И.В.

Технический редактор Малыгина Ю.Н.

Подписано в печать 7.08.08. Формат 60х84 1/16.

Усл. п. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,25.

Печать – ризография, множительно-копировальный

аппарат «RISO TR -1510»

Тираж 50 экз. Заказ 2008-60.

Издательство Алтайского государственного

технического университета

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Оригинал-макет подготовлен ИИО БТИ АлтГТУ

Отпечатано в ИИО БТИ АлтГТУ

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

**С.А. Светлов**

**ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКИ**

Методические рекомендации

к лабораторной работе для студентов специальностей

240706 «Автоматизированное производство химических   
предприятий» и 260601 «Машины и аппараты пищевых производств»

Бийск

Издательство Алтайского государственного технического университета

им. И.И. Ползунова

2008