

На правах рукописи

Михальченкова Анна Николаевна

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ
РАБОТЫ ВИХРЕВОГО АППАРАТА НА ПРОЦЕСС ЭЖЕКЦИИ
ЖИДКИХ СРЕД**

Специальность 05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Лагуткин Михаил Георгиевич, профессор
кафедры «Аппаратурное оформление и
автоматизация технологических
производств» ФГБОУ ВО «Московский
политехнический университет»

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор
Жуков Валерий Григорьевич, главный
научный сотрудник «Всероссийского
научно-исследовательского института
крахмалопродуктов – филиал Федерального
научного центра пищевых систем им. В. М.
Горбатова РАН»

Кандидат технических наук, доцент
Балахнин Игорь Александрович, доцент
кафедры «Технология и оборудование
химических и пищевых производств»
Дзержинского политехнического института
(филиала) ФГБОУ ВО «Нижегородского
государственного технического
университета им. Р.Е.Алексеева»

Ведущая организация

**Открытое акционерное общество
«Научно-исследовательский и
проектный институт азотной
промышленности и продуктов
органического синтеза»**

Защита состоится «22» ноября 2018 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.204.03 при РХТУ им. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д.9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им Д.И. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru/author/238/>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.204.03

Женса А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В различных отраслях промышленности во все времена существовала необходимость получения многокомпонентных смесей, в которых доли соединяемых компонентов строго определены природой проводимого процесса. Организацию таких процессов можно осуществить с помощью соединения требуемых компонентов в смесительном оборудовании после подачи их нагнетательными устройствами. Однако, всегда есть желание сделать производство более выгодным с экономической точки зрения, сохраняя при этом безопасность и надежность функционирования оборудования. В связи с чем существуют предложения по использованию для соединения двух жидкостей струйных насосов и вихревых эжекторов. Аппараты данного типа позволяют отказаться от нагнетательного оборудования на линии подачи одной из сред.

Отличительной особенностью струйных и вихревых насосов является способ подачи активного потока. Ввод эжектирующей среды в струйных устройствах реализуется струей через сопло, а в вихревых – через штуцер, который располагается тангенциально к камере эжектора. Струйные аппараты широко распространены и успешно применяются ввиду того, что для их изучения проведено много опытных исследований и апробаций, на которых построена надежная методика расчета. Но нужно сказать, что струйные насосы достаточно "капризны" в случаях смены режимов функционирования линии, в составе которой находится насос. Струйный аппарат может перестать работать, в то время как вихревой эжектор в равных условиях будет продолжать функционировать с измененным КПД. В литературе встречаются сведения о том, что вихревые эжекторы не уступают по эффективности осуществления процесса эжекции струйным насосам, а в случае наиболее удачного конструктивного оформления, даже опережают их. Однако малая экспериментальная база, которая опирается в основном на лабораторные исследования, и нехватка проверенной последовательности расчета вихревых устройств, не позволяют им соперничать со столь распространенными струйными.

Вышесказанное объясняет интерес к вихревым эжекторам при рассмотрении их как более эффективных аппаратов для организации эжекции.

Цели и задачи работы:

- рассмотреть влияние конструктивных особенностей и режимов работы вихревого эжектора, функционирующего в системе жидкость-жидкость, на коэффициент эжекции;
- найти рациональные соотношения базовых конструктивных элементов вихревого эжектора, функционирующего в системе жидкость-жидкость, обеспечивающие наибольший коэффициент эжекции;
- составить последовательность для расчета вихревого эжектора, функционирующего на жидкостных средах, обеспечивающую заданный коэффициент эжекции;
- осуществить лабораторное исследование, для обоснования допустимости применения выведенных уравнений для определения коэффициента эжекции.

Научная новизна работы:

Результаты исследований влияния конструктивных особенностей вихревого жидкостного эжектора на коэффициент эжекции, позволившие выявить рациональные соотношения базовых конструктивных элементов жидкостного эжектора, при которых обеспечивается наибольшая величина коэффициента эжекции: диаметр штуцера ввода эжектирующей жидкости более 0,15 диаметра камеры эжектора, сумма площадей торцевых сечений штуцера ввода эжектирующей жидкости и штуцера ввода эжектируемой жидкости равна $0,5 \div 0,9$ площади торцевого сечения тангенциального штуцера вывода соединенного потока жидкостей, расстояние от нижнего края тангенциального штуцера ввода эжектирующей жидкости до верхнего края тангенциального штуцера вывода соединенного потока жидкостей более 1,0 диаметра камеры эжектора, диаметр торцевого сечения штуцера ввода эжектируемой жидкости не менее 0,5 диаметра цилиндрической камеры эжектора. Вышеуказанные соотношения базовых геометрических параметров эжектора запатентованы как изобретение РФ №2638100 от 11.12.2017 г.

Результаты исследований влияния режимов функционирования вихревого жидкостного эжектора, а так же физических параметров эжектирующей и эжектируемой жидкостей на величину коэффициента эжекции.

Расчетные зависимости для определения коэффициента эжекции.

Практическая значимость:

- Обоснованы рациональные соотношения базовых конструктивных элементов вихревого жидкостного эжектора, способствующие получению наибольшего коэффициента эжекции.
- Составлена последовательность расчета геометрических параметров и режимов функционирования вихревого эжектора для системы жидкость-жидкость, обеспечивающая требуемую величину коэффициента эжекции.
- Итоги сопоставления струйного и вихревого эжекторов, показывающие преимущество вихревого жидкостного эжектора по габаритным размерам. Вихревой эжектор меньше струйного насоса при тех же показателях функционирования.
- Последовательность расчета аппарата предполагается использовать в проектных работах ООО «Гипрохим».

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были предложены на обсуждение на IX междунар. научно-практич. конф. «Эффективные инструменты современных наук» 2013 г, Прага; междунар. научно-практич. конф. «Роль науки в развитии общества», 2014г, Уфа; XXVII междунар. научно-практич. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-27», 2014 г, Саратов; междунар. научно-практич. конф. студентов, магистрантов и аспирантов имени Л. А. Кастандова, 2014 г, Москва; междунар. научно-практич. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, посвященная 100-летию со дня рождения Л.А. Кастандова, 2015 г, Москва; междунар. научно-практич. конф. «Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее», 2016 г, Саранск; междунар. научно-практич. конф. «Новая наука: проблемы и

перспективы», 2016 г, Стерлитамак; междунар. научно-практич. конф. «Инновации, технологии, наука», 2017 г, Пермь.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из которых 2 в рекомендованных ВАК РФ изданиях, получен патент на изобретение РФ №2638100 от 11.12.2017 г.

На защиту выносятся:

- Результаты анализа влияния конструктивных параметров, режимов работы вихревого жидкостного эжектора и свойств, соединяемых в ходе процесса жидкостей, на коэффициент эжекции.
- Рациональные соотношения базовых элементов конструкции вихревого эжектора, функционирующего в системе жидкость-жидкость, позволившие получить наибольшие коэффициенты эжекции.
- Выведенные зависимости для расчета жидкостного вихревого эжектора.
- Последовательность расчета вихревого аппарата, функционирующего в системе жидкость-жидкость, позволяющая обеспечить требуемое значение коэффициента эжекции.

Достоверность представленных результатов.

Достоверность представленных в диссертации данных подтверждается корректностью целей и задач, а также использованием для изучения показателей функционирования вихревого жидкостного эжектора современного программного продукта Flow Simulation. Прослежена хорошая сходимость данных расчетов по выведенным зависимостям и экспериментальных результатов, организованных на лабораторном оборудовании кафедры АОиАТП МОСКОВСКОГО ПОЛИТЕХА с применением поверенных измерителей.

Объем и структура диссертации.

Диссертация имеет введение, четыре главы, результаты и выводы, и четыре приложения. Общий объем работы составляет 137 страниц, в том числе, 52 рисунка, 7 таблиц. Список литературных источников из 112 наименований.

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность выбранной темы, сформированы цели, установленные в диссертации, определена научная новизна, выявлена практическая значимость, описаны основные положения, которые выносятся на защиту.

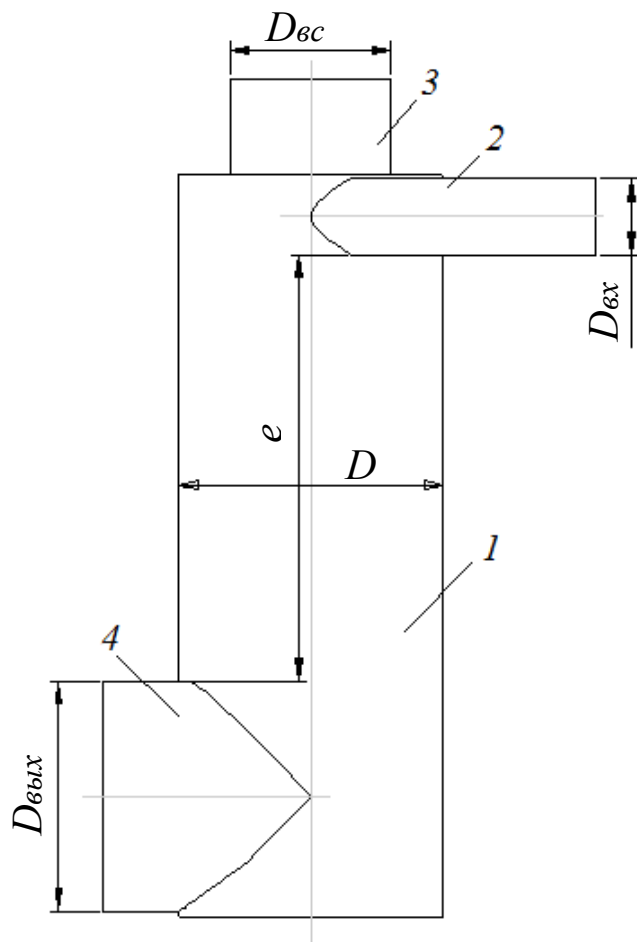
В первой главе отражены представления об организации эжекции в вихревых устройствах и струйных насосах.

Рассмотрены особенности организации эжекции в вихревых эжекторах и других устройствах с аналогичным принципом функционирования. Приведен анализ существующих на сегодняшний день последовательностей расчета конструктивных параметров и характеристик работы вихревых эжекторов. Описано исполнение первых вихревых эжекторов. Проанализирована альтернатива приложения теории подобия к расчету вихревых аппаратов.

Сделаны выводы по обзору литературных источников, назначены задачи исследования.

Во второй главе описаны и обоснованы преимущества выбранной конструкции вихревого жидкостного эжектора. Предложены данные исследования функционирования вихревого эжектора посредством компьютерного моделирования в Flow Simulation, что существенно сокращает издержки материальных средств и временных затрат на осуществление экспериментов, которые необходимы при изучении возможности повышения эффективности вихревого жидкостного эжектора. Идентичность организации гидродинамики процесса в компьютерной модели эжектора и ее опытном образце обоснована путем сопоставления данных, рассчитанных по уравнениям, выведенным с использованием программного обеспечения, и итогов лабораторного эксперимента.

Для проведения расчета гидродинамики процесса в Flow Simulation, была построена модель исследуемого аппарата в Solid Works, которая показана на рисунке 1.



Примечание: 1 – цилиндрическая камера, 2 – штуцер ввода эжектирующей жидкости, 3 – штуцер ввода эжектируемой жидкости, 4 – штуцер вывода соединенного потока жидкостей.

Рисунок 1 – Расчетная схема жидкостного вихревого эжектора.

Вихревой эжектор функционирует следующим образом: эжектирующая жидкость поступает с заданной скоростью в цилиндрическую камеру 1 аппарата по тангенциально расположенному к камере 1 штуцеру ввода эжектирующей жидкости 2 и приобретает траекторию вихря. Внутри эжектора, на оси камеры, образуется разрежение при одновременном росте давления в закрученном потоке жидкости по направлению к стенке камеры 1, посредством чего осуществляется подсос эжектируемой жидкости через штуцер ввода эжектируемой жидкости 3, который размещен коаксиально оси камеры 1 аппарата с торца у штуцера ввода эжектирующей жидкости 2. В камере аппарата эжектирующая и эжектируемая жидкости соединяются и выводятся по тангенциально расположенному к камере эжектора штуцеру вывода соединенного потока жидкостей 4, который установлен с противоположной штуцеру ввода эжектируемой жидкости стороны вихревого эжектора.

Эффективность функционирования вихревого жидкостного эжектора может быть оценена при помощи коэффициента эжекции U , равного отношению массовых расходов эжектируемой и эжектирующей жидкостей.

Главной, установленной в работе задачей, является исследование возможного воздействия на величину коэффициента эжекции соотношений базовых конструктивных элементов и режимов работы эжектора, предназначенного для функционирования в системе жидкость-жидкость. Значимые конструктивные параметры: диаметр камеры 1 (рисунок 1) аппарата, диаметр штуцера ввода эжектирующей жидкости 2 (рисунок 1), диаметр штуцера ввода эжектируемой жидкости 3 (рисунок 1), диаметр штуцера вывода соединенного потока жидкостей 4 (рисунок 1) и длина камеры l (рисунок 1) вихревого эжектора. Помимо указанных геометрических параметров на величину коэффициента эжекции могут влиять такие свойства эжектирующей и эжектируемой жидкостей, как вязкость и плотность. Большая вероятность оказания влияния на величину коэффициента эжекции режимов функционирования аппарата, важнейшими из которых являются скорость подачи эжектирующей жидкости и давление перед штуцером ввода эжектируемой жидкости и на выходе соединенного потока жидкостей.

Коэффициент эжекции в зависимости от указанных характеристик, записывается как функция:

$$U=f(D_{ex}/D; D_{ec}/D; e/D; (F_{ex}+F_{ec})/F_{вых}; Hd/P_{атм}; \rho_{ec}/\rho_{ex}; \mu_{ec}/\mu_{ex}) \quad (1)$$

В ходе исследования рассматривались эжекторы, диаметры камер которых равны 0,05 м, 0,1 м и 0,15 м. Все остальные размеры конструктивных элементов при изменении диаметра камер, варьировались пропорционально масштабу. Когда исследовались возможности влияния на эффективность проведения процесса эжекции конструктивных характеристик эжектора, менялся лишь исследуемый параметр, другие соотношения размеров сохранялись постоянными. Благодаря такому подходу, выявлено, что масштабирование конструкции аппарата не оказывает влияния на величину коэффициента эжекции.

В первом разделе второй главы решается вопрос математического моделирования жидкостной эжекции в аппарате при условии выхода соединенного потока жидкостей в атмосферу и отсутствии разряжения на входе эжектирующей жидкости.

На рисунке 3 изображены графики влияния конструктивных параметров аппарата на коэффициент эжекции. На рисунке 3 а показано влияние соотношения диаметра штуцера ввода эжектирующей жидкости к диаметру камеры эжектора на коэффициент эжекции при $D_{ec}=0,6D$; $F_{ex}+F_{ec}=0,7F_{вых}$; $Hd/P_{атм}=0,08$; $e=1,3D$. Коэффициент эжекции при соотношении $D_{ex}<0,2D$ заметно повышается. Учитывая значительные гидравлические сопротивления при малом диаметре штуцера ввода эжектирующей жидкости, делаем вывод, что функционирование эжектора в интервале значений соотношения $D_{ex}=(0,15-0,25)D$ наиболее рационально.

На рисунке 3 б изображен график влияния соотношения диаметра штуцера ввода эжектируемой жидкости к диаметру камеры эжектора на коэффициент эжекции при $D_{ex}=0,2D$, $F_{ex}+F_{ec}=0,7F_{вых}$; $Hd/P_{атм}=0,08$; $e=1,3D$. Максимальный коэффициент эжекции при $D_{ec}=0,6D$.

На рисунке 3 в изображен график влияния отношения суммы площадей торцевых сечений штуцеров ввода эжектирующей жидкости и ввода эжектируемой жидкости к величине площади торцевого сечения штуцера вывода соединенного потока жидкостей на коэффициент эжекции при $D_{вх}=0,2D$, $D_{вс}=0,6D$; $Hd/P_{атм}=0,08$; $e=1,3D$. Соотношение $F_{вх}+F_{вс}=0,7F_{вых}$ дает возможность достичь наибольшего коэффициента эжекции.

На рисунке 3 г приведен график влияния на коэффициент эжекции соотношения длины между нижним краем штуцера ввода эжектирующей жидкости и верхним краем штуцера вывода соединенного потока жидкостей к диаметру камеры эжектора при $D_{вх}=0,15D$, $D_{вс}=0,6D$, $F_{вх}+F_{вс}=0,7F_{вых}$; $Hd/P_{атм}=0,08$. Коэффициент эжекции будет наибольшим при $e=1,3D$, последующее повышение рассматриваемого соотношения не будет способствовать повышению коэффициента эжекции, но приведет к неоправданному удлинению камеры эжектора, что не рационально.

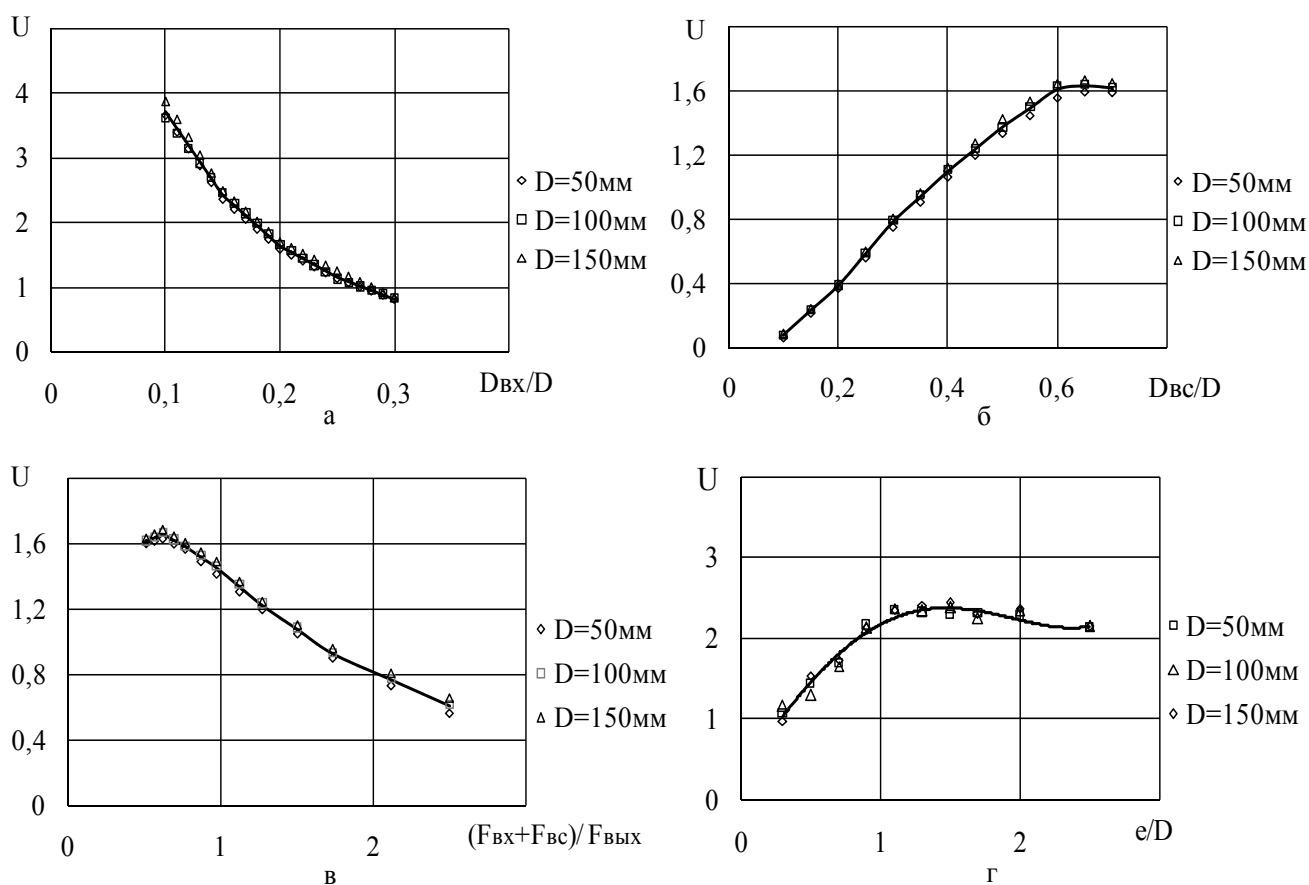


Рисунок 3 – Зависимость величины коэффициента эжекции для устройств с внутренним диаметром камеры D : 50 мм, 100 мм и 150 мм: а - от соотношения диаметра штуцера ввода эжектирующей жидкости к диаметру камеры аппарата; б - от соотношения диаметра штуцера ввода эжектируемой жидкости к диаметру камеры эжектора; в - от соотношения суммы площадей торцевых сечений штуцеров ввода эжектирующей жидкости и ввода эжектируемой жидкости к величине площади торцевого сечения штуцера вывода соединенного потока жидкостей; г - от соотношения длины от нижнего края штуцера ввода эжектирующей жидкости до верхнего края штуцера вывода соединенно потока жидкостей к диаметру цилиндрической камеры эжектора.

На рисунке 4 представлен график влияния соотношения динамического напора

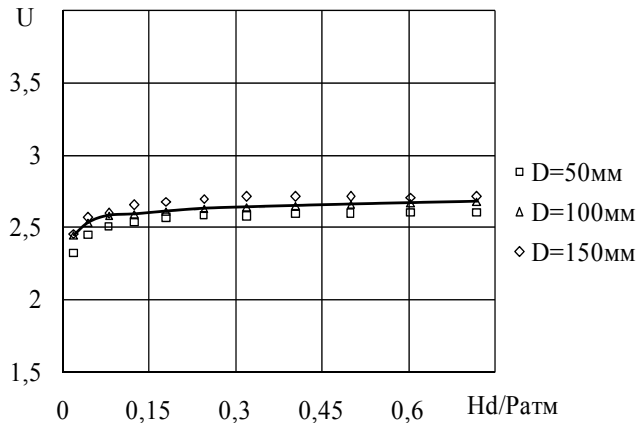


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента эжекции от соотношения динамического напора в штуцере ввода эжектирующей жидкости к нормальному атмосферному давлению для эжекторов с диаметрами камер D : 50 мм, 100 мм и 150 мм.

жидкости в штуцере ввода эжектирующей жидкости к нормальному атмосферному давлению на коэффициент эжекции для $D_{ex}=0,15D$, $D_{ec}=0,6D$, $F_{ex}+F_{ec}=0,7F_{вых}$, $e=1,3D$, $P_{атм}=101325$ Па. При соотношении $Hd/P_{атм}<0,08$ коэффициент эжекции понижается. В течение лабораторного эксперимента (глава 4) было выявлено, что функционирование вихревого жидкостного эжектора при соотношениях $Hd/P_{атм}<0,08$ не стабильно. Следовательно, рабочие соотношения динамического напора в штуцере ввода эжектирующей жидкости к нормальному атмосферному давлению должны быть не менее 0,08.

На рисунке 5 изображены графики влияния соотношений плотностей и вязкостей эжектирующей и эжектируемой жидкостей на коэффициент эжекции. На рисунке 5 а представлен график влияния соотношения плотности эжектируемой жидкости к плотности эжектирующей жидкости на коэффициент эжекции для $D_{ex}=0,15D$, $D_{ec}=0,6D$, $F_{ex}+F_{ec}=0,7F_{вых}$; $Hd/P_{атм}=0,396$; $e=1,3D$. Исследуемые соотношения плотностей лежат в интервале значений $\rho_{вс}/\rho_{вх}=(0,497-1,471)$. С увеличением соотношения плотности эжектируемой жидкости по отношению к плотности эжектирующей жидкости, коэффициент эжекции повышается. На рисунке 5 б показан график влияния соотношения вязкости эжектируемой жидкости к вязкости эжектирующей жидкости на коэффициент эжекции для $D_{ex}=0,15D$, $D_{ec}=0,6D$, $F_{ex}+F_{ec}=0,7F_{вых}$; $Hd/P_{атм}=0,396$; $e=1,3D$. Исследуемые соотношения вязкостей контактируемых жидкостей лежат в интервале $\mu_{вс}/\mu_{вх}=(0,2-40,2)$. При увеличении вязкости эжектируемой жидкости по отношению к вязкости эжектирующей жидкости, коэффициент эжекции снижается.

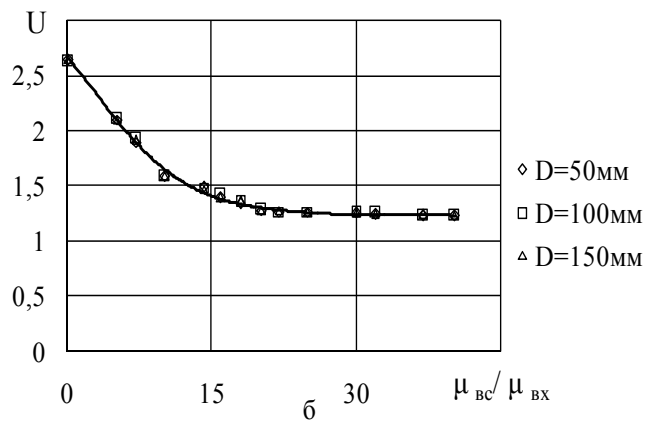
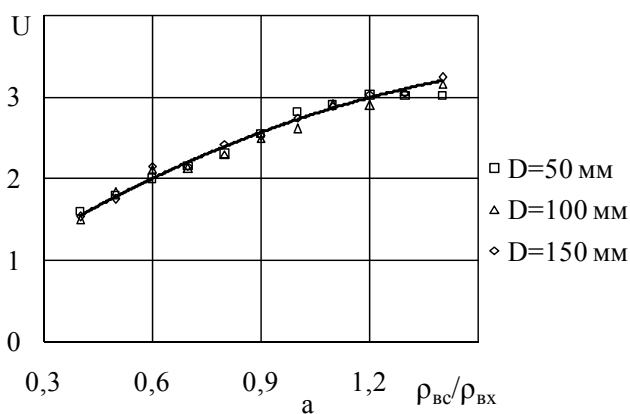


Рисунок 5 – Зависимости коэффициента эжекции для устройств с внутренними диаметрами камер D : 50 мм, 100 мм и 150 мм: а - от соотношения плотностей эжектирующей и эжектируемой жидкостей; б - от соотношения вязкостей эжектирующей и эжектируемой жидкостей.

Рассматриваемые графические зависимости (рисунки 3-5), можно описать, используя степенную функцию. Таким образом, уравнение (1) при соотношении e/D равном 1.3, запишется в следующем виде:

$$u = k \left(\frac{Hd}{P_{атм}} \right)^{n_1} \left(\frac{D_{вх}}{D} \right)^{n_2} \left(\frac{D_{вс}}{D} \right)^{n_3} \left(\frac{F_{вх} + F_{вс}}{F_{вых}} \right)^{n_4} \left(\frac{\rho_{вс}}{\rho_{вх}} \right)^{n_5} \left(\frac{\mu_{вх}}{\mu_{вс}} \right)^{n_6} \quad (2),$$

После нахождения степеней, при условии атмосферного давления перед штуцером вывода соединенного потока и отсутствием противодействия на вводе эжектируемой жидкости, зависимость (2) для расчета коэффициента эжекции, принимает вид:

$$u_{атм} = 0,198 \cdot \left(\frac{Hd}{P_{атм}} \right)^{0,058} \left(\frac{D_{вх}}{D} \right)^{-1,459} \left(\frac{D_{вс}}{D} \right)^{n_1} \left(\frac{F_{вх} + F_{вс}}{F_{вых}} \right)^{n_2} \left(\frac{\rho_{вс}}{\rho_{вх}} \right)^{0,538} \left(\frac{\mu_{вх}}{\mu_{вс}} \right)^{n_3} \quad (3),$$

где $n_1=1,901$ при $D_{вс}=[0,2 - 0,5]D$; $n_1=0,98$ при $D_{вс}=[0,5 - 0,6]D$; $n_1=0,389$ при $D_{вс}=[0,6-0,7]D$; $n_2=-0,384$ при $(F_{вс}+F_{вх})=[0,5-1,23]F_{вых}$; $n_2=-0,721$ при $(F_{вс}+F_{вх})=(1,23-2)F_{вых}$; $n_3=-0,002$ при $\mu_{вс}=[0,2-1]\mu_{вх}$; $n_3=-0,023$ при $\mu_{вс}=[1-30,2]\mu_{вх}$; $n_3=-0,121$ при $\mu_{вс}=(30,2-40,2)\mu_{вх}$.

Второй раздел второй главы содержит данные изучения воздействия изменения давления перед штуцером вывода соединенной жидкости и штуцером ввода эжектируемой жидкости на коэффициент эжекции.

Выявлено, что понижение давления перед штуцером ввода эжектируемой жидкости проявляет влияние в той же степени на коэффициент эжекции, что и рост давления на выходе соединенной жидкости. Следовательно, при расчете коэффициента эжекции нужно учитывать разность давлений на выходе соединенной жидкости и на вводе эжектируемой жидкости $\Delta P_{вых}=(P_{вых}-P_{вс})$, величина $\Delta P_{вых}$ описывает перепад давлений, формируемый в аппарате.

В ходе исследования стало понятно, что влияние соотношения перепада давления в эжекторе к нормальному атмосферному давлению $(P_{вых}-P_{вс})/P_{атм}$ на коэффициент эжекции имеет линейный характер и записывается в виде:

$$u = u_{атм} - k1 \left(\frac{P_{вых} - P_{вс}}{P_{атм}} \right) \quad (4),$$

где $u_{атм}$ – коэффициент эжекции в условиях вывода соединенной жидкости в атмосферу и отсутствия противодействия на вводе эжектируемой жидкости, находится из уравнения (3), $P_{атм}$ – нормальное атмосферное давление, $k1$ – коэффициент, который находится из зависимости:

$$k1 = j \left(\frac{Hd}{P_{атм}} \right)^{m_1} \left(\frac{D_{вх}}{D} \right)^{m_2} \left(\frac{D_{вс}}{D} \right)^{m_3} \left(\frac{F_{вх} + F_{вс}}{F_{вых}} \right)^{m_4} \left(\frac{\rho_{вс}}{\rho_{вх}} \right)^{m_5} \left(\frac{\mu_{вх}}{\mu_{вс}} \right)^{m_6} \quad (5),$$

На рисунках 6–8 показаны графики влияния конструктивных соотношений эжектора, свойств жидкостей и скорости подачи эжектирующей жидкости на коэффициент $k1$ при изменении значения соотношения $(P_{вых}-P_{вс})/P_{атм}$ от 0 до 0,05.

На рисунке 6 а показан график зависимости значения коэффициента k_1 от соотношения величины диаметра штуцера ввода эжектирующей жидкости к величине диаметра камеры эжектора при $D_{вс}=0,6D$; $F_{вх}+F_{вс}=0,7F_{вых}$; $Hd/P_{атм}=0,08$; $e=1,3D$; $P_{вых}-P_{вс}=(0\div 0,05)P_{атм}$. На рисунке 6 б представлена зависимость значения коэффициента k_1 от соотношения диаметра штуцера ввода эжектируемой жидкости к диаметру камеры вихревого эжектора для $D_{вх}=0,2D$, $F_{вх}+F_{вс}=0,7F_{вых}$; $Hd/P_{атм}=0,08$; $e=1,3D$; $P_{вых}-P_{вс}=(0\div 0,05)P_{атм}$

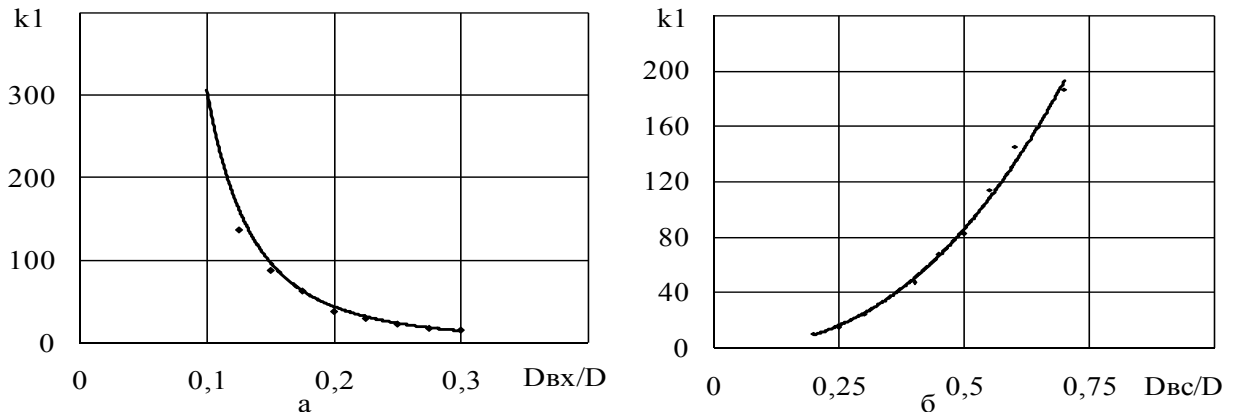


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента k_1 : а - от соотношения величины диаметра штуцера ввода эжектирующей жидкости к величине диаметра камеры эжектора, б - от соотношения диаметра штуцера ввода эжектируемой жидкости к диаметру камеры вихревого эжектора.

На рисунке 7 а показана зависимость коэффициента k_1 от соотношения суммы площадей торцевых сечений штуцеров ввода эжектирующей жидкости и ввода эжектируемой жидкости к величине площади торцевого сечения штуцера вывода соединенного потока жидкостей при $D_{вх}=0,15D$, $D_{вс}=0,6D$; $Hd/P_{атм}=0,08$; $e=1,3D$; $P_{вых}-P_{вс}=(0\div 0,05)P_{атм}$. На рисунке 7 б зависимость коэффициента k_1 от соотношения величины динамического напора в штуцере ввода эжектирующей жидкости к атмосферному давлению при $D_{вх}=0,15D$, $D_{вс}=0,6D$, $F_{вх}+F_{вс}=0,7F_{вых}$, $e=1,3D$, $P_{атм}=101325$ Па; $P_{вых}-P_{вс}=(0\div 0,05)P_{атм}$

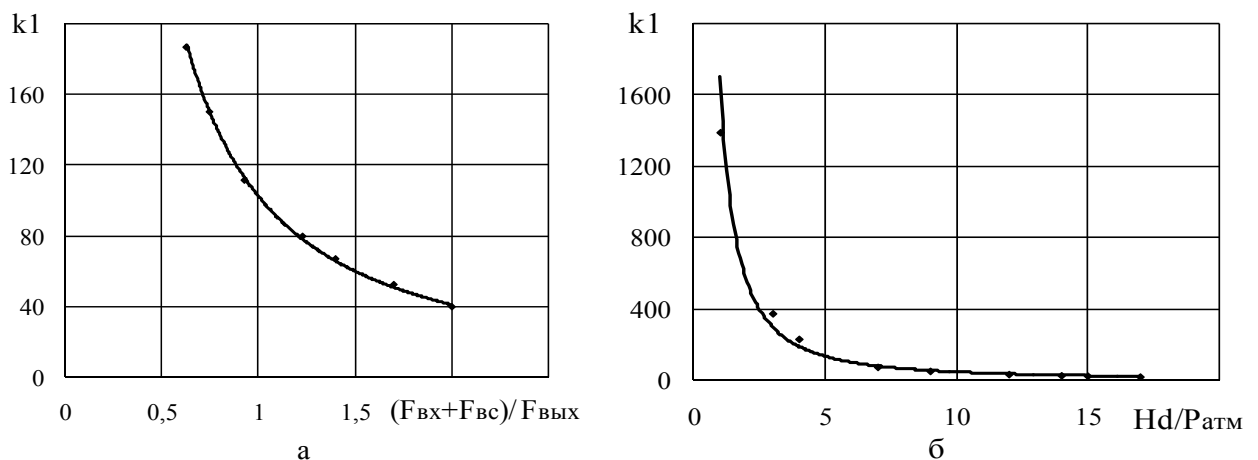


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента k_1 : а - от соотношения суммы площадей торцевых сечений штуцеров ввода эжектирующей жидкости и ввода эжектируемой жидкости к величине площади торцевого сечения штуцера вывода соединенного потока жидкостей, б - от соотношения величины динамического напора в штуцере ввода эжектирующей жидкости к нормальному атмосферному давлению.

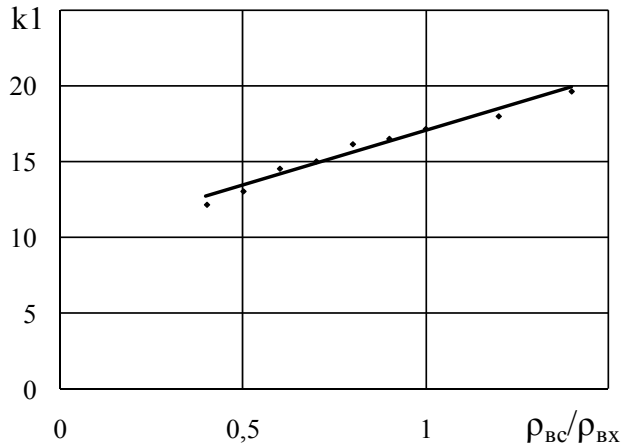


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента $k1$ от соотношения плотности эжектируемой жидкости к плотности эжектирующей жидкости.

вязкости эжектируемой жидкости к вязкости эжектирующей жидкости незначительное, следовательно, данный параметр при подсчете коэффициента эжекции, в случае разряжения перед штуцером эжектируемой жидкости и противодействия на выводе соединенной жидкости, не дает значительной погрешности и не учитывается.

В результате проведенных исследований уравнение для определения коэффициента эжекции в условиях наличия давления (противодействия) перед штуцерами вывода соединенного потока жидкостей и ввода эжектируемой жидкости примет вид:

$$u = u_{атм} - 0,266 \cdot \left(\frac{Hd}{P_{атм}} \right)^{-0,793} \left(\frac{D_{вх}}{D} \right)^{-2,762} \left(\frac{D_{вс}}{D} \right)^{2,353} \left(\frac{F_{вх} + F_{вс}}{F_{вх}} \right)^{-1,312} \left(\frac{\rho_{вс}}{\rho_{вх}} \right)^{0,379} \left(\frac{P_{вс} - P_{атм}}{P_{атм}} \right)^{0,93} \quad (6),$$

где $u_{атм}$ рассчитывается по зависимости (3)

Третий раздел второй главы включает в себя результаты изучения воздействия избыточного давления на вводе эжектируемой жидкости и разряжения на выводе соединенной жидкости. С целью наиболее полного описания процесса эжекции в устройстве, необходимо изучить условия его работы, при которых возможно повышение давления перед штуцером ввода эжектируемой жидкости и условия разряжения перед штуцером вывода соединенного потока жидкостей. Такие условия характерны для последовательного подключения нескольких эжекторов. Таким образом, составлена формула для расчета коэффициента эжекции при $(P_{вс} - P_{атм}) > 0$, $(P_{вх} - P_{атм}) < 0$:

$$u = u_{атм} + 0,266 \cdot \left(\frac{Hd}{P_{атм}} \right)^{-0,793} \left(\frac{D_{вх}}{D} \right)^{-2,762} \left(\frac{D_{вс}}{D} \right)^{2,353} \left(\frac{F_{вх} + F_{вс}}{F_{вх}} \right)^{-1,312} \left(\frac{\rho_{вс}}{\rho_{вх}} \right)^{0,379} \left(\frac{P_{вс} - P_{вх}}{P_{атм}} \right)^{0,93} \quad (7)$$

В четвертом разделе второй главы приведены расчетные зависимости для вычисления гидравлического сопротивления жидкостного эжектора. Так как давление перед штуцерами ввода эжектируемой жидкости и вывода соединенного потока жидкостей чаще всего задаются первоначально, то для определения гидравлических потерь, нужно знать давление, формируемое в штуцере ввода эжектирующей жидкости. Данные результатов исследований показали, что давление эжектирующей жидкости

В диссертации рассматриваются зависимости коэффициента $k1$ от свойств исследуемых жидкостей. На рисунке 8 представлена зависимость коэффициента $k1$ от соотношения плотности эжектируемой жидкости к плотности эжектирующей жидкости при $D_{вх} = 0,15D$, $D_{вс} = 0,6D$, $F_{вх} + F_{вс} = 0,7F_{вх}$; $Hd/P_{атм} = 0,08$; $e = 1,3D$; $P_{вх} - P_{вс} = (0 \div 0,05)P_{атм}$. Соотношение исследуемых плотностей контактируемых жидкостей лежат в интервале значений $\rho_{вс}/\rho_{вх} = (0,497 - 1,2)$.

В ходе работы выявлено, что изменение коэффициента $k1$ от отношения

зависит от конструкции устройства, от скорости ввода эжектирующей жидкости, свойств контактируемых жидкостей и давления перед штуцерами ввода эжектируемой жидкости и вывода соединенного потока жидкостей. Уравнение определения относительного давления $P_{\text{вхотн}} = P_{\text{вх}}/P_{\text{атм}}$, предусматривающее воздействие указанных характеристик, имеет вид:

$$P_{\text{вхотн}} = j_1 \frac{P_{\text{вхск}}}{P_{\text{атм}}} \frac{P_{\text{вхех}}}{P_{\text{атм}}} \frac{P_{\text{вхес}}}{P_{\text{атм}}} \frac{P_{\text{вхвых}}}{P_{\text{атм}}} \frac{P_{\text{вхпл}}}{P_{\text{атм}}} \frac{P_{\text{вхвязк}}}{P_{\text{атм}}}, \quad (8),$$

$$\text{где } \frac{P_{\text{вхск}}}{P_{\text{атм}}} = \left(-1,0567 \left(\frac{Hd}{P_{\text{атм}}} \right)^3 + 2,726 \left(\frac{Hd}{P_{\text{атм}}} \right)^2 - 1,802 \left(\frac{Hd}{P_{\text{атм}}} \right) - 0,606 \right) \left(\frac{P_{\text{атм}} - \Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{атм}}} \right) + 1,092 \left(\frac{Hd}{P_{\text{атм}}} \right) + 1,879$$

$$\frac{P_{\text{вхех}}}{P_{\text{атм}}} = \left(-0,24 \ln \left(\frac{D_{\text{ех}}}{D} \right) - 1,27 \right) \left(\frac{P_{\text{атм}} - \Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{атм}}} \right) - 2,599 \left(\frac{D_{\text{ех}}}{D} \right)^{0,111},$$

$$\frac{P_{\text{вхес}}}{P_{\text{атм}}} = \left(-1,352 \frac{D_{\text{ес}}}{D} - 0,253 \right) \left(\frac{P_{\text{атм}} - \Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{атм}}} \right) + 1,307 \frac{D_{\text{ес}}}{D} + 1,556,$$

$$\frac{P_{\text{вхвых}}}{P_{\text{атм}}} = \left(-0,855 \left(\frac{F_{\text{вых}}}{F_{\text{ех}} + F_{\text{ес}}} \right) - 0,335 \right) \left(\frac{P_{\text{атм}} - \Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{атм}}} \right) + \left(0,88 \left(\frac{F_{\text{вых}}}{F_{\text{ех}} + F_{\text{ес}}} \right) + 1,627 \right),$$

$$\frac{P_{\text{вхпл}}}{P_{\text{атм}}} = \left(0,933 \left(\frac{\rho_{\text{ес}}}{\rho_{\text{ех}}} \right)^3 - 2,456 \left(\frac{\rho_{\text{ес}}}{\rho_{\text{ех}}} \right)^2 - 0,124 \left(\frac{\rho_{\text{ес}}}{\rho_{\text{ех}}} \right) \right) \left(\frac{P_{\text{атм}} - \Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{атм}}} \right) + \left(-0,917 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{ес}}}{\rho_{\text{ех}}} \right)^2 + 2,405 \cdot \left(\frac{\rho_{\text{ес}}}{\rho_{\text{ех}}} \right) + 1,187 \right),$$

$$\frac{P_{\text{вхвязк}}}{P_{\text{атм}}} = \left(0,046 \ln \left(\frac{\mu_{\text{ес}}}{\mu_{\text{ех}}} \right) - 0,928 \right) \left(\frac{P_{\text{атм}} - \Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{атм}}} \right) + 2,216 \cdot \left(\frac{\mu_{\text{ес}}}{\mu_{\text{ех}}} \right)^{-0,02},$$

$$j_1 = 1,04 \cdot 10^{-2} \cdot e^{1,849 \left(\frac{P_{\text{атм}} - \Delta P_{\text{вых}}}{P_{\text{атм}}} \right)}.$$

В третьей главе предложена последовательность расчета жидкостного вихревого эжектора.

Исходными данными, необходимыми для расчета, являются следующие параметры: требуемая величина коэффициента эжекции (U), расход эжектирующей жидкости ($Q_{\text{вх}}$, кг/с), скорость ввода эжектирующей жидкости ($\omega_{\text{ех}}$, м/с), плотность эжектирующей жидкости ($\rho_{\text{вх}}$, кг/м³), плотность эжектируемой жидкости ($\rho_{\text{вс}}$, кг/м³), вязкость эжектирующей жидкости ($\mu_{\text{вх}}$, Пас), вязкость эжектируемой жидкости ($\mu_{\text{вс}}$, Пас).

Определяем значение гидродинамического напора в штуцере подачи эжектирующей жидкости 2 (рисунок 1) по формуле:

$$Hd = \frac{\rho_{\text{ех}} \omega_{\text{ех}}^2}{2} \quad (9)$$

Затем находим площадь сечения штуцера ввода эжектирующей жидкости 2 (рисунок 1):

$$F_{\text{ех}} = \frac{Q_{\text{ех}}}{\rho_{\text{ех}} \omega_{\text{ех}}} \quad (10)$$

Диаметр сечения цилиндрической камеры 1 (рисунок 1) жидкостного вихревого эжектора связан с диаметром сечения штуцера ввода эжектирующей жидкости 2 (рисунок 1) зависимостью:

$$D = \frac{D_{\text{вх}}}{(0,15-0,25)} \quad (11)$$

В первом приближении для снижения материалоемкости, задаемся наибольшим значением соотношения $D_{\text{вх}}/D$, это обеспечивает минимальный диаметр цилиндрической камеры 1 эжектора.

Диаметр штуцера ввода эжектируемой жидкости 3 (рисунок 1) определяется зависимостью:

$$D_{\text{вс}} = (0,5 - 0,6)D \quad (12)$$

Наибольшее значение диаметра штуцера ввода эжектируемой жидкости выбираем, когда давление перед штуцером ввода эжектируемой жидкости и перед штуцером вывода соединенного потока жидкостей равно атмосферному. При наличии противодавления на выходе из аппарата и на входе эжектируемой жидкости, выбираем меньший диаметр штуцера ввода эжектируемой жидкости.

Площадь сечения штуцера вывода соединенного потока жидкостей 4 (рисунок 1) находится из соотношения:

$$F_{\text{вых}} = \frac{F_{\text{вх}} + F_{\text{вс}}}{(0,5-0,9)} \quad (13)$$

Длина цилиндрической камеры 1 (рисунок 1) жидкостного вихревого эжектора складывается из следующих составляющих:

$$L = D_{\text{вх}} + e + D_{\text{вых}} \quad (14)$$

где e – расстояние от нижнего края штуцера ввода эжектирующей жидкости 1 (рисунок 1) до верхнего края штуцера вывода соединенного потока жидкостей 4 (рисунок 1), находится из уравнения:

$$e = 1,3D \quad (15)$$

Используя формулу (3) рассчитываем величину коэффициента эжекции, учитывая равенство давления перед штуцерами вывода соединенного потока жидкостей и на входе эжектируемой жидкости атмосферному давлению. При получении значения коэффициента эжекции ниже требуемого, возвращаемся к уравнению (11) и увеличиваем диаметр цилиндрической камеры 1 (рисунок 1) жидкостного вихревого эжектора.

При условии давлений на выходе из штуцера вывода соединенного потока жидкостей 4 (рисунок 1) и на входе в штуцер ввода эжектируемой жидкости 3 (рисунок 1) отличных от атмосферного, коэффициент эжекции считается по формулам (6), (7) в зависимости от характера давления перед штуцерами.

Предложенная последовательность расчета вихревого жидкостного эжектора позволяет подобрать конструктивные элементы вихревого жидкостного эжектора и режимы его работы, которые будут способствовать обеспечению требуемого значения коэффициента эжекции.

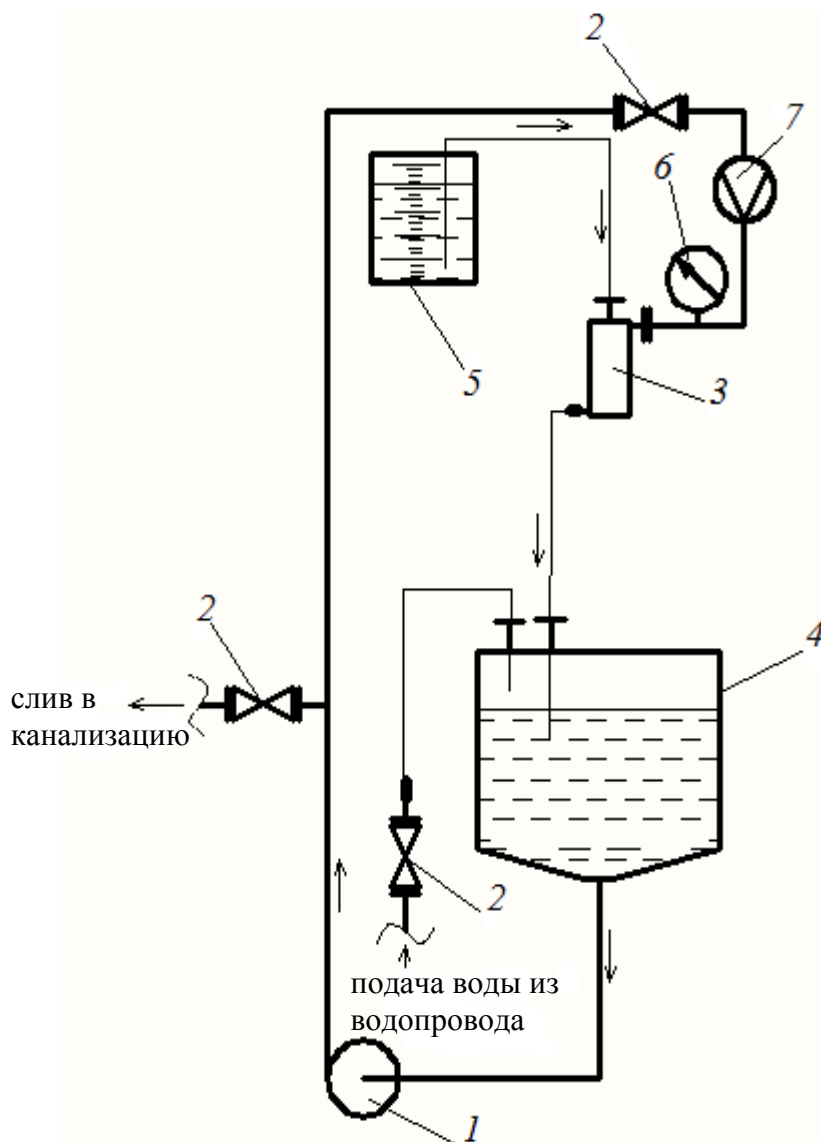
Во втором разделе третьей главы произведено сопоставление жидкостного вихревого и струйного эжекторов при организации эжекции в равных условиях, предполагающих соблюдение равенства следующих параметров работы: массового расхода эжектирующей жидкости, располагаемого перепада давлений эжектирующей

жидкости, перепада давлений, создаваемого аппаратом. Данные расчетов показали, габариты струйного насоса больше, чем у вихревого жидкостного эжектора. Помимо меньшей материалоемкости, конструкция вихревого эжектора допускает возможность перехода на иной режим функционирования, подразумевающий смену расхода эжектирующей жидкости, либо изменение гидравлических сопротивлений, без пересчета и замены конструктивных соотношений. В струйном насосе уменьшение либо увеличение расхода эжектирующей жидкости окажет большее влияние на работоспособность по сравнению с вихревым эжектором и потребует пересчета конструктивных размеров сопла подачи эжектирующей жидкости, что повлечет за собой пересчет других составляющих конструкции.

В четвертой главе отображено лабораторное исследование опытного образца жидкостного вихревого эжектора, проводившееся для доказательства возможности

применения выведенных математических зависимостей.

На рисунке 9 изображена схематически лабораторная установка. На экспериментальном стенде процесс происходит следующим образом: с помощью циркуляционного насоса 1 эжектирующая жидкость из бака 4, предварительно пройдя регулирующий вентиль 2, поступает тангенциально по штуцеру подачи эжектирующей жидкости в эжектор 3 и приобретает траекторию вихря. На оси эжектора образуется разрежение, благодаря чему подсасывается эжектируемая жидкость из мерной емкости 5 через штуцер, расположенный в верхней части аппарата 3 коаксиально его камере. Эжектирующая и эжектируемая жидкости соединяются и выводятся с другой стороны камеры аппарата через штуцер вывода соединенного потока жидкостей, и поступает в бак 4. Давление эжектирующей жидкости на



Примечание: 1 – циркуляционный насос, 2 – регулировочный вентиль, 3 – вихревой жидкостной эжектор, 4 – емкость слива соединенного потока, 5 – мерная ёмкость с эжектируемой жидкостью, 6 – манометр, 7 – расходомер.

Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки.

вводе в аппарат регистрировалось манометром 6. Во время проведения исследования лабораторного эжектора изменялся расход эжектирующей жидкости посредством регулировочного вентиля 2. Расход эжектирующей жидкости определялся при помощи водосчетчика СГВ-20. Расход эжектируемой жидкости определялся косвенным путем, измеряя время, за которое подсасывался фиксированный объем эжектируемой жидкости, секундомером.

Полученные экспериментально и рассчитанные по зависимости 3 данные в виде графика влияния гидродинамического напора в штуцере ввода эжектирующей жидкости на коэффициент эжекции, представлены на рисунке 10.

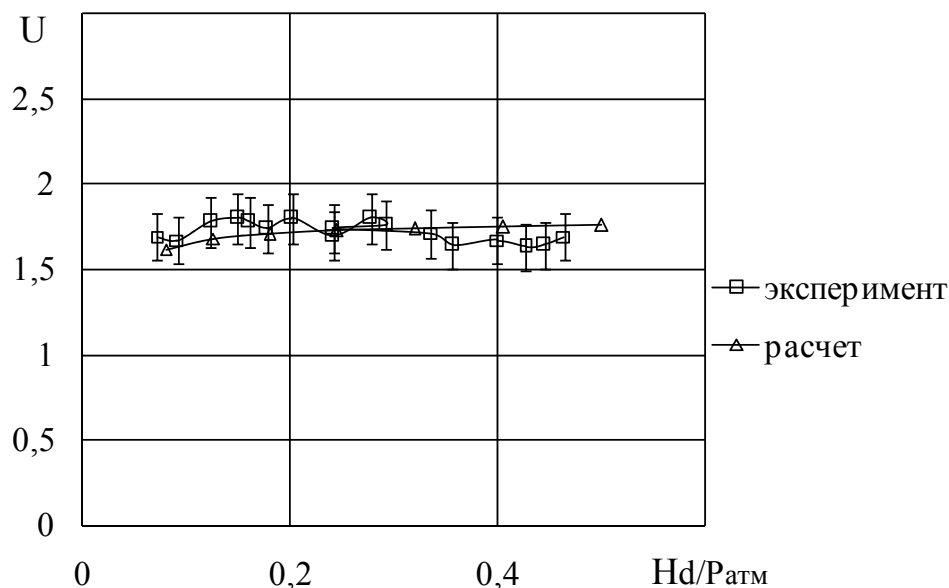


Рисунок 10 – Сопоставление зависимостей коэффициентов эжекции, полученного экспериментально – u , и рассчитанного по уравнению 3 – u_p , от гидродинамического напора в штуцере ввода эжектирующей жидкости.

Величина отклонения расчетных данных от опытных менее 10%, что подтверждает достоверность полученных расчетных зависимостей.

В заключении представлены итоги и результаты осуществленного исследования, заключающиеся в следующем:

1. Для осуществления эжекции жидкостных сред целесообразно применять вихревые эжекторы, являющиеся наиболее экономичными в изготовлении и удобными в обслуживании при сопоставлении со струйными.
2. Областью применения вихревых жидкостных эжекторов являются процессы химических производств, где необходимо дозированное смешивание и растворение жидких сред, например подкисление культуральной жидкости в производстве лизина.
3. Выявлены рациональные соотношения базовых конструктивных элементов вихревого эжектора, позволяющие достичь наибольших значений коэффициента эжекции: диаметр ввода эжектирующей жидкости более 0,15 диаметра цилиндрической камеры эжектора, сумма площадей торцевых сечений штуцера ввода эжектирующей жидкости и штуцера ввода эжектируемой жидкости составляет $0,5 \div 0,9$ площади торцевого сечения штуцера вывода соединенного потока жидкостей, длина от нижнего края тангенциального

штуцера ввода эжектирующей жидкости до верхнего края штуцера вывода соединенного потока жидкостей более 1,0 диаметра камеры эжектора, диаметр торцевого сечения штуцера ввода эжектируемой жидкости более 0,5 диаметра цилиндрической камеры эжектора. Вышеуказанные соотношения базовых конструктивных параметров эжектора запатентованы как изобретение РФ № 2638100 от 11.12.2017 г.

4. Составлены зависимости для расчета коэффициента эжекции вихревых жидкостных эжекторов.

5. Экспериментально проверена возможность применения выведенных зависимостей для расчета коэффициента эжекции вихревых эжекторов.

6. Предложена последовательность расчета жидкостного вихревого эжектора, с помощью которой определяются конструктивные параметры устройства для получения необходимой величины коэффициента эжекции.

7. Предложенная в диссертации последовательность расчета вихревого эжектора для жидкостных сред принята к использованию в ООО «Гипрохим».

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

u – коэффициент эжекции; D – диаметр цилиндрической камеры вихревого жидкостного эжектора, м; $D_{вх}$ – диаметр штуцера ввода эжектирующей жидкости, м; $D_{вс}$ – диаметр штуцера ввода эжектируемой жидкости, м; $F_{вх}$ – площадь торцевого сечения штуцера ввода эжектирующей жидкости, м²; $F_{вс}$ – площадь торцевого сечения штуцера ввода эжектируемой жидкости, м²; $F_{вых}$ – площадь торцевого сечения штуцера вывода соединенного потока жидкостей, м²; e – длина от нижнего края штуцера ввода эжектирующей жидкости до верхнего края штуцера вывода соединенного потока жидкостей, м; l – длина вихревого жидкостного эжектора, м; Hd – динамический напор в штуцере ввода эжектирующей жидкости, Па; $Q_{вх}$ – массовый расход эжектирующей жидкости, кг/с; $\rho_{вс}$ – плотность эжектируемой жидкости, кг/м³; $\rho_{вх}$ – плотность эжектирующей жидкости, кг/м³; $\mu_{вс}$ – вязкость эжектируемой жидкости, Пас; $\mu_{вх}$ – вязкость эжектирующей жидкости, Пас; $\omega_{вх}$ – скорость ввода эжектирующей жидкости, м/с; $P_{вх}$ – давления эжектирующей жидкости, Па; $P_{вых}$ – давление на выводе из аппарата, Па; $P_{вс}$ – давление эжектируемой жидкости, Па; $P_{атм}$ – нормальное атмосферное давление, Па; $u_{атм}$ – коэффициент эжекции в условиях атмосферного давления перед штуцерами ввода эжектируемой жидкости и вывода соединенного потока жидкостей; $P_{вхвс}$ – величина, описывающая влияние $\Delta P_{вых}$ на $P_{вх}$ при изменении $D_{вх}/D$, Па; $P_{вхвс}$ – величина, описывающая влияние $\Delta P_{вых}$ на $P_{вх}$ при изменении $D_{вс}/D$, Па; $P_{вхск}$ – величина, описывающая влияние $\Delta P_{вых}$ на $P_{вх}$ при изменении скорости подачи эжектирующей жидкости, Па; $P_{вхпл}$ – величина, описывающая влияние $\Delta P_{вых}$ на $P_{вх}$ при изменении соотношения плотностей эжектируемой и эжектирующей жидкостей, Па; $P_{вхвязк}$ – величина, описывающая влияние $\Delta P_{вых}$ на $P_{вх}$ при изменении соотношения вязкостей эжектируемой и эжектирующей жидкостей, Па; $P_{вхвых}$ – величина, описывающая влияние $\Delta P_{вых}$ на $P_{вх}$ при изменении $F_{вых}/(F_{вх} + F_{вс})$, Па; $k, k1, j$ – коэффициенты пропорциональности.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

В рецензируемых научных изданиях:

1. Лагуткин М.Г., Михальченкова А.Н., Бутрин М.М. Влияние конструктивных и режимных параметров работы вихревого аппарата на величину коэффициента эжекции // Энергосбережение и водоподготовка. - М.: «Сам Полиграфист», 2015. - № 3 (95). – с.55-59.
2. Михальченкова А.Н., Лагуткин М.Г., Бутрин М.М. Методика расчета вихревого эжектора // Технологии нефти и газа. - М.: «ТУМА ГРУПП», 2017. - № 5 (112). – с. 46-49.

В других изданиях:

3. Лагуткин М.Г., Михальченкова А.Н., Бутрин М.М. Зависимость величины коэффициента эжекции от конструктивных и режимных параметров работы вихревого эжектора. // Энергосбережение и водоподготовка. - М.: «Сам Полиграфист», 2017. - №3.с. 48-53

Патент:

4. Патент на изобретение РФ № 2638100 от 11.12.2017 г.

Материалы конференций:

5. Михальченкова А.Н., Лагуткин М.Г. Анализ влияния конструктивных и режимных параметров работы вихревого эжектора для системы жидкость-жидкость на коэффициент эжекции. // сборник статей Международной научно-практической конференции Роль науки в развитии общества, 2014, ч.2, с. 52-56
6. Михальченкова А.Н., Лагуткин М.Г., Артамонов Я.А. Эффективность работы вихревого эжектора при изменении давления на выводе из аппарата.// Межд. научн. периодич-е изд. по итогам между. научно-практ. конференции. – Стерлитамак, 2016. – с. 206-209. : РИЦ АМИ
7. Михальченкова А.Н., Лагуткин М.Г., Бутрин М.М. «Влияние давления на выводе соединенного потока жидкостей вихревого эжектора на величину коэффициента эжекции». // Межд. научно-практическая конференция «Инновационная наука: прошлое, настоящее, будущее», Саранск, МЦИИ «ОМЕГА САЙНС», 2016. с. 43-45.
8. Михальченкова А.Н., Лагуткин М.Г., Бутрин М.М. «Влияние конструктивных и режимных параметров работы вихревого аппарата на величину коэффициента эжекции». // XXVII Международная научн. конф-я «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-27», 2014., Саратов, с. 128-131.
9. Михальченкова А.Н., Лагуткин М.Г., Бутрин М.М. «Зависимость величины коэффициента эжекции от конструктивных и режимных параметров работы вихревого аппарата», Сборник международной научно-технической конференции «Инновации, технологии, наука», 2017, Пермь, ч.3, с. 82-88.
10. Михальченкова А.Н., Лагуткин М.Г., Исаев С.В. «Исследование работы вихревого эжектора с помощью компьютерного моделирования». IX Межд. научно-практич. конференция «Эффективные инструменты современных наук» 2013 г, Прага.