

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра механики многофазных систем

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ
В ГЭК И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ

И.о. заведующего кафедрой
к.ф.-м.н.


23.08. 2017 г. П.Ю. Михайлов

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА ДИСПЕРСНОЙ
СТРУКТУРЫ В СУЖАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ

16.04.01 Техническая физика

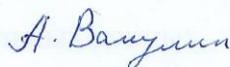
Магистерская программа «Теплофизика в нефтегазовых и строительных
технологиях»

Выполнил работу
Студент 2 курса
очной формы обучения



Будев
Петър
Бориславов

Научный руководитель
д. т. н., профессор



Вакулин
Александр
Анатольевич

Рецензент
Начальник лаборатории
поверки теплотехнических
средств измерений ФБУ
«Тюменский ЦСМ»



Иванчук
Галина
Васильевна

г. Тюмень, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА С ПОМОЩЬЮ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ	6
1.1. Классификация стандартных сужающих устройств	6
1.2. Конструктивные особенности сужающих устройств.....	8
2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАСХОДОМЕРАХ И ИЗМЕРЯЕМЫХ СРЕДАХ	13
2.1. Классификация и описание	13
2.2. Отличительные особенности расходомеров переменного перепада давления	14
2.3. Классификация двухфазных систем	17
3. ОСНОВЫ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ ЧЕРЕЗ ШТУЦЕР	22
3.1. Движение однофазного потока.....	22
3.2. Многофазный поток.....	23
3.3. Алгоритм расчета течения в штуцере	29
4. ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА.....	34
4.1. Описание стенда.....	34
4.2. Методика проведения измерений и получения качественных и количественных данных	35
4.3. Обоснование выбора штуцера	36
4.4. Обработка экспериментальных данных	37
4.5. Результаты исследований.....	38
4.6. Оценка неопределенности измерения расхода	43
4.7. Сопоставление с расчетными данными	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	49

АННОТАЦИЯ

Тюменский Государственный Университет, Физико-технический институт, кафедра механики многофазных систем, Перекопская 15а.

Будев Петър Бориславов. Тема магистерской диссертации: «Исследование многофазного потока дисперсной структуры в сужающем устройстве».

Магистерская диссертация – 60 страницы, 27 рисунков, 49 источников литературы.

Ключевые слова: сужающее устройство, расходомер, многофазный поток, расход, дисперсная структура, перепад давления.

Объект исследования: процесс прохождения двухфазной смеси воздуха с водой через сужающее устройство. Цель работы – получение экспериментальных зависимостей массового расхода двухфазного потока от перепада давления на сужающем устройстве, при различных концентрациях жидкой фазы.

Рассмотрены теоретические основы измерения расхода с помощью сужающих устройств. Изучены: общие сведения о расходомерах и измеряемых средах; основы движения среды через штуцер.

В ходе экспериментальной части: собран стенд; проведены исследования; произведена обработка экспериментальных данных и их сопоставление с теоретическими. Сделано заключение, даны рекомендации для дальнейшего изучения и применения на практике.

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы технологического контроля дебита нефтяной скважины представляет весьма актуальную, но в тоже время сложную задачу, возникающую при разработке месторождений. Острота проблемы обуславливается жесткой необходимостью увеличения уровня отдачи при добыче нефти и сопутствующих полезных ископаемых, что не представляется возможным без качественного оперативного влияния на режим работы скважин.

Для оперативного управления процессом добычи, геологам, разработчикам, технологам и другим специалистам, необходимо иметь как можно больше информации о поднимаемой из скважины смеси из нефти, газа и воды.

Почти повсеместно в нефтедобывающей и перерабатывающей промышленности определение количества добываемого продукта на устье скважины производится путем замера сепарированных жидкостей и газа с помощью обычных однофазных измерительных приборов, устанавливаемых на выпускных трубах для газа, нефти и воды двух- или трехфазных сепараторов. Точность таких измерений невелика, а продолжительность их может составлять от нескольких часов до суток. [1]

В связи с этим в настоящее время все более актуальными становятся исследования многофазных потоков, которые в свою очередь, позволят разрабатывать новые виды расходомеров с более высокими показателями точности, надежности и меньшей стоимостью. [42]

В настоящее время, согласно литературным данным [39, 42, 43], на нефтегазовых месторождениях эксплуатируется ряд многофазных расходомеров, не требующих предварительной сепарации. Большинство из них производится иностранными компаниями, что играет немаловажную роль в условиях сложившейся экономической ситуации.

Расходомеры переменного перепада давления благодаря таким преимуществам как простота конструкции, надежность и низкая цена являются наиболее распространенными устройствами для измерения расхода широкого

спектра однофазных веществ. [39] Несмотря на то, что в последние годы проводятся различного рода исследования [5-9, 11, 12, 24, 32-35, 40], целью которых является получение данных об особенностях движения многофазного потока в частности через различные сужающие устройства, которые в свою очередь представляют собой одну из основных частей расходомеров переменного перепада давления, имеется обширное поле для экспериментов.

В связи с этим, объектом исследований был выбран процесс прохождения двухфазной смеси воздуха с водой через сужающее устройство.

Цель работы заключена в получении экспериментальных и расчетных зависимостей массового расхода двухфазного газожидкостного потока от перепада давления на сужающем устройстве, при различных концентрациях жидкой фазы.

Задачи:

1. Модернизация экспериментальной установки для изучения многофазных потоков.
2. Получение экспериментальных данных о движении двухфазного газожидкостного потока.
3. Анализ полученных экспериментальных данных и их сопоставление с рассчитанными теоретическими зависимостями.
4. На основе полученных результатов сформулировать выводы и рекомендации по дальнейшему направлению исследований.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА С ПОМОЩЬЮ СУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

1.1. Классификация стандартных сужающих устройств

Принцип измерения расхода расходомером переменного перепада давления основан на изменении перепада давления, в зависимости от расхода вещества. Замеры происходят на неподвижном сужающем устройстве, установленном в трубопроводе или элементе трубопровода (колена).

Расходомеры переменного перепада давления имеют в своем составе три основных элемента: сужающее устройство, дифференциальный манометр, для измерения перепада давления, и соединительные линии с запорной и предохранительной арматурой. [30]

Применяются следующие стандартные сужающие устройства: диафрагмы, сопла, сопла и трубы Вентури.

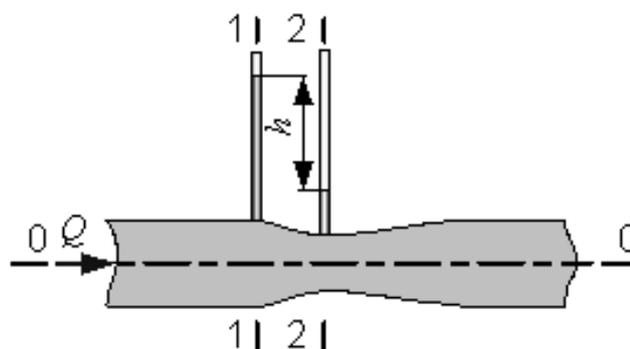


Рисунок 1. Схема измерения расхода. Пояснения в тексте.

Установленное в трубопроводе сужающее устройство (рисунок 1) приводит к увеличению скорости в суженном сечении. В результате этого, часть потенциальной энергии давления переходит в кинетическую, поэтому статическое давление в меньшем сечении становится ниже статического давления перед сужающим устройством. Перепад давлений зависит от скорости движения жидкости, следовательно, и от расхода.

Для вывода основного уравнения расхода жидкости, протекающей через сужающие устройства, используется уравнение Д. Бернулли, составленное для сечений 1–1 и 2–2. Сечение 1–1 выбирается перед сужающим устройством, а сечение 2–2 в сжатом сечении. Плоскость сравнения проводится по оси трубопровода. Потери напора между сечениями не учитываются. [2]

В этом случае уравнение Бернулли имеет вид

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \quad (1)$$

где p_1, p_2 – давления на участках 1 и 2; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность; v_1, v_2 – скорости на участках 1 и 2; α_1, α_2 – коэффициенты Кориолиса.

Для дальнейшего решения уравнения относительно v_1 необходимо использовать уравнение неразрывности, при этом принять во внимание, что $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, а разность слагаемых, содержащих давление равна высоте h , получим:

$$v_1 = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} \sqrt{h} \quad (2)$$

здесь ω_1, ω_2 – адиабатические постоянные.

Теоретический расход Q_T в трубопроводе определяется по формуле

$$Q_T = \frac{\omega_1 \sqrt{2g}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 - 1}} \sqrt{h} \quad (3)$$

Перепишем уравнение

$$Q_T = C \sqrt{h} \quad (4)$$

где C – постоянная расходомера.

При выводе зависимости (4) не учитывались потери энергии, поэтому фактический расход будет меньше теоретического. Это несоответствие расходов характеризуется коэффициентом расхода:

$$\mu = \frac{Q}{Q_T} \quad (5)$$

Таким образом, окончательная формула для определения расхода принимает следующий вид:

$$Q = \mu C \sqrt{h} = A \sqrt{h} \quad (6)$$

где A – коэффициент расхода расходомера. [2]

1.2. Конструктивные особенности сужающих устройств

При измерении расхода методом переменного перепада давления используются правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами ГОСТ 8.586-2005.

Стандартные (нормализованные) сужающие устройства должны отвечать требованиям этих нормативов и применяться для измерения расхода вещества без их индивидуальной градуировки.

Диафрагмы. При измерении расхода жидкости широкое применение нашли диафрагмы, благодаря простоте конструкции, удобству монтажа и демонтажа. Стандартные диафрагмы (рисунок 2), представляющие собой диск с отверстием, могут быть с угловым или фланцевым способом отбора перепада давления. [17]

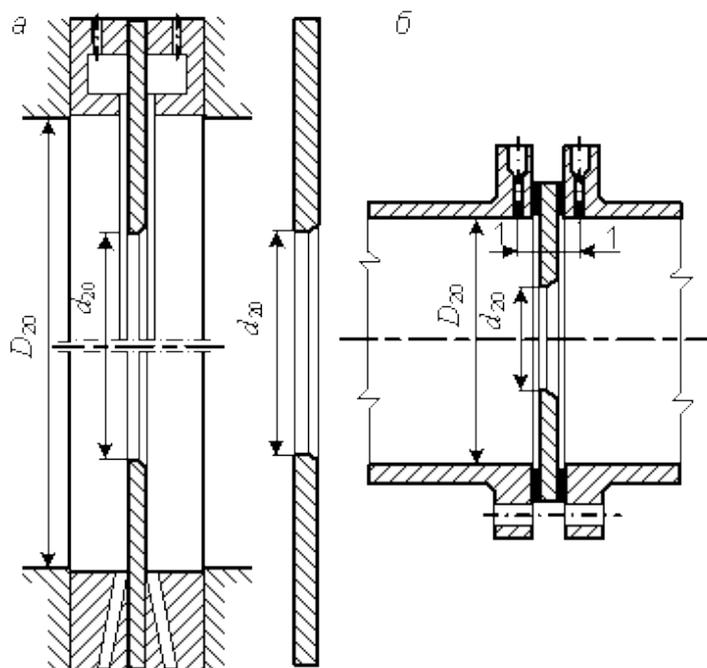


Рисунок 2. Схемы стандартных диафрагм. [17]

а – с угловым способом отбора перепада давления; б – с фланцевым способом отбора перепада давления. D_{20} – внутренний диаметр измерительного трубопровода (ИТ) (при 20 °С); d_{20} – диаметр проходного отверстия (при 20 °С).

Конструктивно диафрагмы выполняются камерными или бескамерными. В бескамерных диафрагмах отбор перепада давления осуществляется через отверстия в фланцах или трубопроводе.

Кольцевые камеры необходимы для осреднения и выравнивания давления по периметру сечения. Это делается с целью снижения погрешности измерений. Камеры выполняют в ободах или обоймах диафрагмы. Для труб диаметром более 400 мм камеры выполняются в виде кольцевой трубки, охватывающей трубопровод.

Точность измерений расхода с помощью диафрагм существенно зависит от качества их установки и наличия перед ними участков труб расчетного диаметра без дополнительных источников возмущений (заусенцы, сварные швы, колена, тройники, запорная арматура). [17]

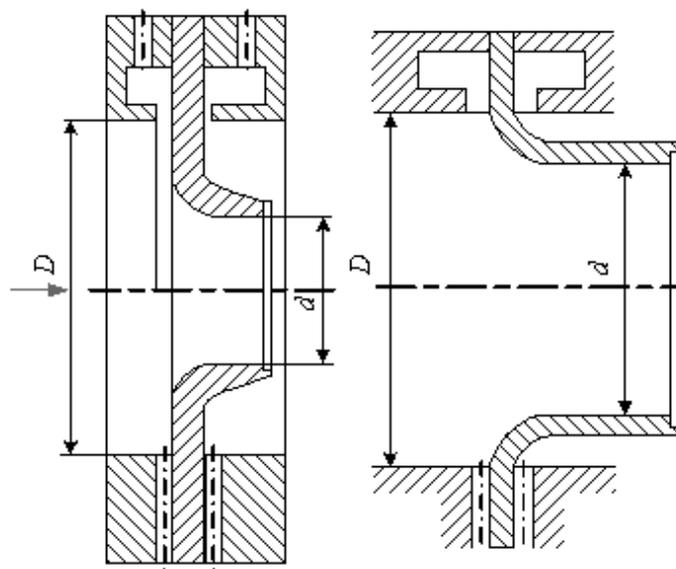


Рисунок 3. Схемы стандартных сопел. [17]

D – внутренний диаметр ИТ; d – диаметр проходного отверстия.

Основным недостатком диафрагмы является то, что она обладает большим гидравлическим сопротивлением и вызывает значительные потери напора. [17]

Основное уравнение расхода (3) справедливо и для сопел. Расходомерное сопло (рисунок 3) представляет собой устройство с цилиндрическим отверстием,

имеющим плавно сужающуюся часть на входе и цилиндрическую часть на выходе. [18]

Точность измерения расхода соплами несколько выше точности измерения диафрагмами за счет отсутствия дополнительной погрешности на недостаточную остроту входной кромки. Сопла, в качестве сужающих устройств для расходомеров, распространения не получили, так как потери напора в них немногим меньше, чем в диафрагмах, а изготовление их значительно сложнее. [43] Сужающим устройством, обладающим высокой точностью измерения расхода при отсутствии больших потерь напора, является сопло Вентури. Соплом Вентури называется сужающее устройство, входная часть которого выполнена по форме стандартного сопла, а в устье имеется конус, служащий для уменьшения потерь напора.

В зависимости от длины и центрального угла конуса различают длинные и укороченные сопла Вентури. В системах водоснабжения и водоотведения чаще используются укороченные сопла Вентури. Сопла Вентури изготавливают двух типов (рисунок 4). [18]

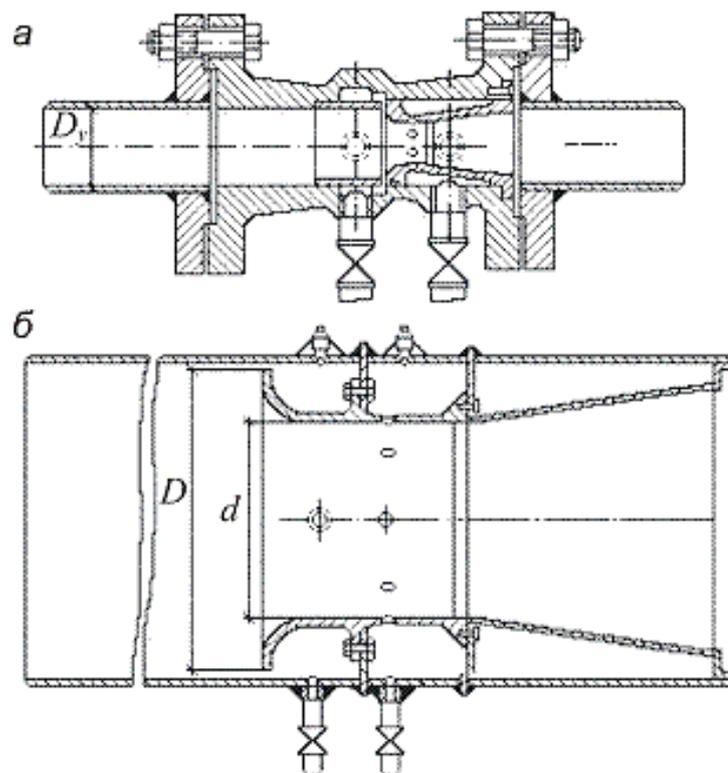


Рисунок 4. Схема сопел Вентури. [18]

а – первого типа; б – второго типа. D_y – условный диаметр трубопровода; D – внешний диаметр сопла; d – внутренний диаметр сопла.

Первый тип предназначен для труб с диаметром условного прохода от 50 до 200 мм, выполняется с соплом из цветных металлов и чугуном корпусом. Второй тип предназначен для труб условным проходом от 250 до 1400 мм. При установке сопла Вентури необходимо соблюдать соосность трубы и сопла. Вблизи сопла Вентури должны отсутствовать источники, приводящие к искажению потока.

Трубы Вентури. Трубы Вентури были предложены ранее других сужающих устройств. В зависимости от размеров диффузора трубы Вентури бывают короткими и длинными. Различают три конструктивных исполнения труб Вентури:

А – стальные сварные из листового материала на $D_y = 200-1400$ мм, P_y до 16 МПа (максимальное рабочее давление);

Б – с литыми необработанными входными частями, обработанной горловиной на $D_y = 100-800$ мм, P_y до 25 МПа;

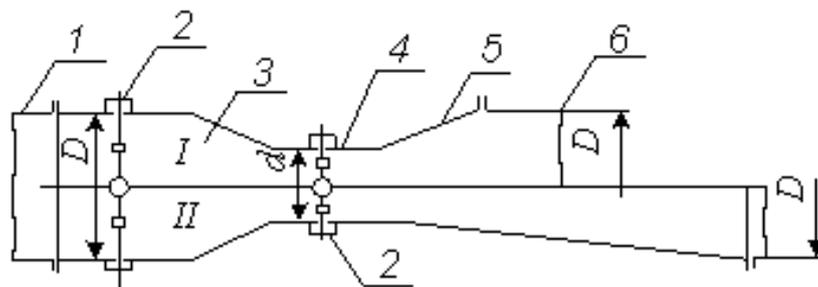


Рисунок 5. Схема труб Вентури. [19]

I – короткая труба; II – длинная труба; 1 – входной патрубок; 2 – кольцевые камеры; 3 – входной конус; 4 – горловина; 5 – выходной конус; 6 – выходной патрубок.

В – с обработанными входным патрубком, конусом и горловиной на D_y 50-250 мм, P_y до 4 МПа. Наиболее простыми и удобными в изготовлении являются сварные трубы Вентури.

Стандартные трубы Вентури (рисунок 5) состоят из следующих основных частей: входного цилиндра, сужающего конуса, горловины, расширяющегося

конуса и выходного цилиндра. Изготовление производится путем сварки отдельных составляющих. Отбор давления осуществляется из усредняющих кольцевых камер. В нижней части кольцевых камер устанавливаются трехходовые краны для спуска жидкости. [19]

Особенностью стандартных труб Вентури является их малая металлоемкость. Необходимые длины прямых участков перед трубами Вентури существенно меньше, чем перед диафрагмами и соплами. Преимуществом данных труб являются малые потери напора, возможность измерения расхода загрязненной жидкости, долговечность. Единственным существенным недостатком является громоздкость. [19]

К специальных сужающим устройствам относятся [21]:

- стандартные диафрагмы для трубопроводов с D_y менее 50 мм;
- диафрагмы с коническим входом;
- износостойчивые диафрагмы;
- двойные диафрагмы;
- сегментные диафрагмы;
- эксцентричные диафрагмы;
- цилиндрические сопла;
- сопла «четверть круга».

Нашли широкое применение и расходомеры со специальными сужающими устройствами. С их помощью измерение расхода и (или) количества газа осуществляют при:

- подаче газа в факел низкого или высокого давлений;
- выбросе газообразных продуктов сгорания через дымоходы в атмосферу;
- выбросе загрязненных газовых потоков через вентиляционные системы в атмосферу;
- выбросе газа в окружающую среду от иных устройств.
- заборе воды из естественных и искусственных водоемов;
- измерение расхода технологических сред.

2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАСХОДОМЕРАХ И ИЗМЕРЯЕМЫХ СРЕДАХ

2.1. Классификация и описание

Технические устройства, предназначенные для измерения массового или объемного расхода, называют расходомерами. При этом в зависимости от того, для измерения какого (объемного или массового) расхода предназначены расходомеры, их подразделяют на объемные и массовые. [26]

В настоящее время в России и за рубежом создано большое число типов расходомеров из-за сложности требований и многообразия задач. При выборе расходомеров учитывают свойства измеряемой среды, ее параметры, обоснованность требований к точности измерения, сложность измерительного устройства и условия его эксплуатации и поверки. [30]

Отечественные и иностранные производители предлагают широкий ассортимент счётчиков и расходомеров с различными принципами работы, конструкциями и назначением для нефтегазовой отрасли, магистральных газо- и нефтепроводов с большим расходом транспортируемой продукции.

В соответствии с ГОСТ 15528-86 и других нормативов расходомеры и счетчики подразделяют на четыре группы.

Группа А: Приборы, основанные на гидродинамических методах: переменного перепада давления; переменного уровня; обтекания; вихревые; парциальные.

Группа Б: Приборы с непрерывно движущимся телом: тахометрические; силовые (в т. ч. вибрационные).

Группа В: Приборы, основанные на различных физических явлениях: тепловые; электромагнитные; акустические; оптические; ядерно-магнитные; ионизационные.

Группа Г: Приборы, основанные на особых методах: корреляционные; меточные; концентрационные.

Среди приборов группы А исключительно широкое применение получили расходомеры с СУ, относящиеся к приборам переменного перепада давления. Для малых расходов жидкостей и газов служат ротаметры и поплавковые приборы, относящиеся к расходомерам обтекания. Весьма перспективны вихревые расходомеры.

Из группы Б значительное применение находят различные разновидности тахометрических расходомеров: турбинные, шариковые и камерные, последние – в качестве счётчиков газа, нефтепродуктов и других жидкостей.

Среди приборов группы В чаще всего применяют электромагнитные расходомеры для измерения расхода электропроводных жидкостей и ультразвуковые для измерения жидкостей и частично газа. Реже встречаются тепловые – для измерения малых расходов жидкостей и газов.

Расходомеры группы Г: меточные и концентрационные служат для разовых измерений, например, при проверке промышленных расходомеров на месте их установки. Корреляционные приборы перспективнее, в частности, для измерения двухфазных сред. [30] Очевидно, данная классификация не является исчерпывающей, так как с каждым годом разрабатываются и внедряются новые способы и средства измерений расхода.

В отечественной практике наибольшее применение получили расходомеры первых пяти групп. Данные расходомеры выпускаются серийно и находят применение практически во всех отраслях народного хозяйства. Расходомеры остальных групп используются, в основном, для решения специальных измерительных задач (при научных исследованиях, в медицине, криогенике, при измерениях агрессивных и токсичных сред и т. п.), изготавливаются единичными экземплярами или малыми партиями и являются на сегодняшний день не стандартизованными средствами измерений. [31]

2.2. Отличительные особенности расходомеров переменного перепада давления

Принцип действия данного вида расходомеров, основан на измерении перепада давления, образующегося в результате изменения скорости измеряемого потока на специальном сужающем устройстве. (Рисунок 6)



Рисунок 6. Изображение сужающего устройства в измерительном трубопроводе.

Они получили довольно широкое распространение и составляют не менее 70 процентов всех расходомеров, применяемых как в России, так и за рубежом.

Такое широкое распространение имеет место в виду целого ряда достоинств:

1) сужающие устройства — простые, дешевые и надежные средства измерения расхода;

2) сужающие устройства универсальны, т. е. могут применяться для измерения расхода практически любых однофазных (иногда и двухфазных) сред в широком диапазоне давлений, температур, расходов и диаметров трубопровода;

3) градуированная характеристика стандартных сужающих устройств может быть определена расчетным путем, поэтому отпадает необходимость в образцовых расходомерных установках;

4) возможность использования для различных условий измерения однотипных по устройству датчиков перепада давления и вторичных приборов; индивидуальным для каждого расходомера является только сужающее устройство.

[39]

Наиболее важными недостатками являются:

1) нелинейная зависимость между расходом и перепадом, что не позволяет измерять расходы менее 0,3 от верхнего предела измерений прибора из-за высокой погрешности измерения (если использовать один датчик перепада давления);

2) необходимость индивидуальной градуировки сужающих устройств при измерении расходов при малых числах Рейнольдса или в трубах малого диаметра;

3) расходомеры с сужающими устройствами имеют ограниченную точность, причем погрешность измерения колеблется в широких пределах от 1,5 до 3 % в зависимости от состояния сужающего устройства, диаметра трубопровода, постоянства давления и температуры измеряемой среды;

4) ограниченное быстродействие из-за наличия длинных импульсных трубок и в связи с этим трудности при измерении быстро изменяющихся расходов.

Современная измерительная практика предъявляет все более высокие требования к точности, надежности, быстродействию, функциональности расходомеров. Следует отметить, что в большинстве случаев эти требования неоднозначны, т.е. улучшение одних характеристик, как правило, достигается за счет ухудшения других. Так, увеличение функциональных возможностей приборов за счет усложнения их конструкций снижает их надежность вследствие возрастания числа подверженных отказам элементов. Увеличение быстродействия снижает эффективность систем автоматической компенсации медленно меняющихся погрешностей, вызванных влиянием внешней среды, параметров измеряемых объектов и др.

Значительная часть серийно выпускаемых расходомеров имеет класс точности 1 - 1,5 %. Если принять, что измерения преимущественно проводятся в середине шкалы, относительная погрешность этих измерений составляет 2 - 3 %. С учетом же воздействия различных влияющих факторов действительная погрешность может быть еще выше. [31]

В то же время для эффективного управления технологическими процессами в нефтяной, газовой, химической отраслях, энергетическими и транспортными установками, для коммерческих операций уже сегодня имеется потребность на порядок более высокая точность измерения расхода. Именно это обстоятельство

обуславливает необходимость создания и внедрения расходомеров, имеющих класс не хуже 0,1 - 0,3 %. [26]

Характерная особенность расходоизмерительной практики – чрезвычайно широкая номенклатура измеряемых веществ, имеющих различные физико-химические свойства — плотность, вязкость, температуру, фазовый состав и структуру. [26] Поэтому в этой области измерений особенно остро стоит проблема создания приборов инвариантных (малочувствительных) к физико-химическим свойствам измеряемых сред, к малоинформативным параметрам входного сигнала.

2.3. Классификация двухфазных систем

Двухфазные вещества могут быть трех типов: смесь жидкости и твердой фазы, смесь газа и твердой фазы и смесь жидкости с газом или паром. К первым из них относятся различные гидросмеси или пульпы. Они встречаются часто. Гидротранспорт перемещает по трубам каменный уголь и торф, мелкоизмельченную руду и горные породы, каолин и целлюлозу, калийные и кальцинированные соли, строительные растворы и бетонные смеси, древесную и бумажную массу, различные шламы, песок, грунт и многие другие материалы. [30] Смесь газа с твердой фазой имеет место при движении по трубам пылеугольного топлива и при пневмотранспорте муки, цемента и других подобных веществ. Газонасыщенная нефть и влажный пар — примеры двухфазной смеси третьего типа. [3]

Измерение расхода двухфазных веществ имеет свои особенности и трудности, связанные с неомогенностью состава смеси, различием скоростей отдельных фаз, а также их концентрацией и структурой. [27]

Из-за неомогенности структуры концентрация отдельных фаз нередко меняется по длине трубы, и поэтому измерение мгновенного расхода имеет небольшое практическое значение. В этом случае лишь среднее значение расхода за некоторый интервал времени может правильно характеризовать двухфазный поток. Минимальный интервал осреднения зависит от структуры потока и для

газожидкостных веществ может достигать в некоторых случаях 90-100 с. Далее средняя скорость тяжелой фазы, как правило, меньше скорости легкой фазы. Это серьезно усложняет определение как среднего расхода смеси, так и расхода его отдельных фаз и приводит к необходимости различать истинную и расходную концентрацию фаз, а также истинную и расходную плотность смеси. [31]

Структура двухфазного потока зависит от многих обстоятельств: скорости потока, диаметра трубопровода, его расположения в пространстве и процентного содержания той или другой фазы (рисунок 7). Это особенно резко выражено для смесей жидкости с газом или паром.

Если концентрация одной из фаз мала, то получим дисперсную или пузырьковую структуру, при которой капли жидкости (или пузырьки пара) равномерно распределены в паре (или жидкости). С увеличением доли жидкости начинаются расслоение фаз и появление раздельного течения. [28]

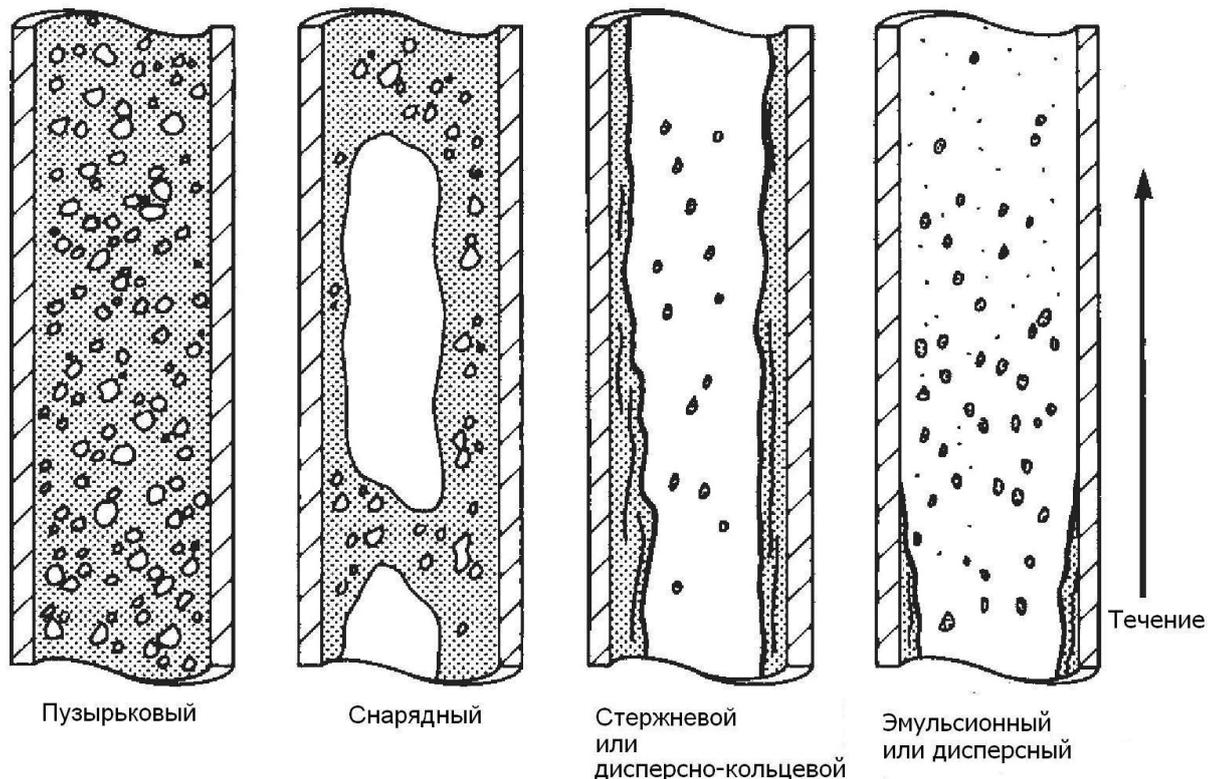


Рисунок 7. Структура двухфазного потока в вертикальных трубопроводах. [3]

Пояснения в тексте.

По вертикальной трубе флюид все в большей степени располагается в виде кольцевого слоя вдоль стенок, а в средней части еще сохраняется дисперсионно-

капельная структура. Такую переходную структуру называют дисперсионно-кольцевой. При дальнейшем увеличении доли жидкости в смеси наступает полностью расслоенное течение, которое в вертикальной трубе имеет кольцевую структуру, центральная часть заполнена одним паром или газом. [3]

В горизонтальной трубе при расслоенном течении нет кольцевого слоя жидкости (рисунок 7). Последняя под действием сил тяжести все в сильнее опускается вниз и движется по нижней части трубы, а в верхней ее части перемещаются пар или газ вместе с еще не осевшими каплями жидкости.

В горизонтальной трубе при расслоенном течении нет кольцевого слоя жидкости (рисунок 8). Последняя под действием сил тяжести все в большей мере опускается вниз и движется по нижней части трубы, а в верхней ее части перемещаются пар или газ вместе с еще не осевшими каплями жидкости.

С увеличением скорости потока и одновременным возрастанием доли жидкости на поверхности раздела фаз начинают возникать волновые гребни. [28] Они растут с увеличением скорости и начинают рассекать на отдельные части поток пара или газа, движущийся в центре вертикальной трубы или в верхней части горизонтальной трубы. Так возникает пробковая или снарядная структура потока.

Здесь пар или газ перемещаются в виде отдельных пробок или пузырей, перекрывающих полностью или частично сечение трубы. Их частота (от доли 1 Гц до 4-5 Гц) зависит от скорости потока или, точнее, от числа Фруда, и от расходного газосодержания. [31] При дальнейшем росте доли жидкости газовые пробки уменьшаются в размере, переходя частично в мелкие газовые пузыри. Возникает пузырьково-снарядная структура, которая затем переходит в пузырьковую. В вертикальной трубе пузырьки распределены равномерно по сечению, а в горизонтальной они движутся в верхней части.

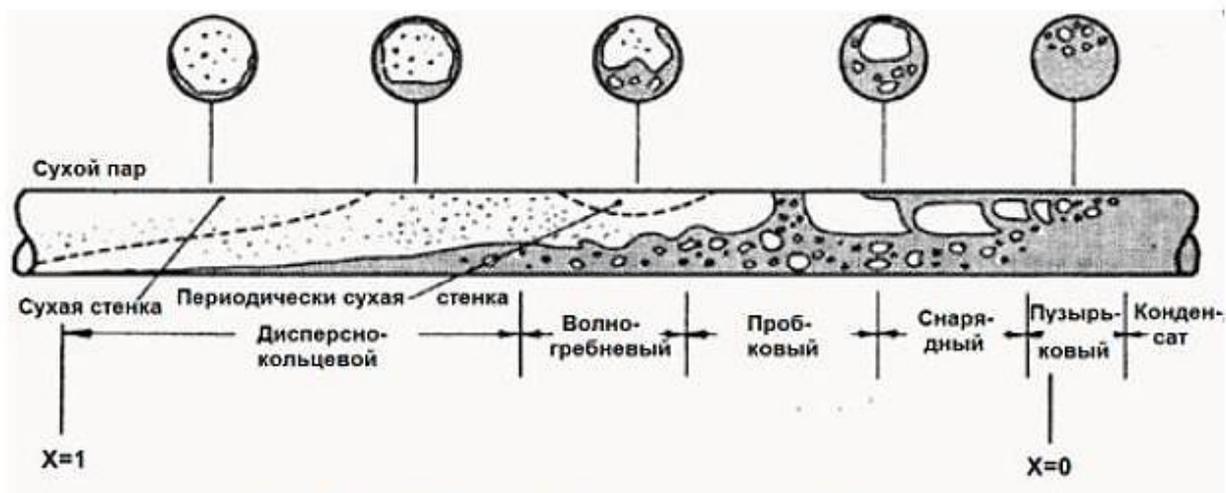


Рисунок 8. Структура двухфазного потока в горизонтальных трубопроводах. [3]

Пояснения в тексте.

При увеличении доли газа в смеси имеем обратную картину перехода от жидкостного однофазного потока к пузырьковой, пузырьково-снарядной и пробочковой или снарядной структуре. При дальнейшем увеличении газосодержания в потоке, сопровождающемся обычно увеличением средней скорости газа, происходит переход от пробочковой структуры к расслоенному течению, вначале с волнами на границе раздела фаз. [37] Амплитуда этих волн уменьшается по мере увеличения доли газа тем раньше, чем меньше средняя скорость потока, и поверхность раздела фаз становится гладкой. Затем наступает дисперсная структура и при полном отсутствии жидкости образуется однофазный поток.

Из широкой номенклатуры различных разновидностей расходомеров обтекания для измерения расхода двухфазных веществ находят применение лишь расходомеры с лопастью, воспринимающей динамическое давление потока. Преимущественно они служат для измерения расхода смесей твердой и газообразной фаз. Формы тела обтекания разнообразны. [38] Так, для измерения расхода пылевоздушных смесей применяли жесткий диск на упругой подвеске, а также тонкую упругую пластинку, закрепленную одним концом для измерения расхода суспензии, имеющей высокую концентрацию твердой фазы (до 25 % по

объему), тело обтекания имело лобовую часть полушаровой формы, переходящую в конический обтекаемый хвостовик. [31]

Давление на тело обтекания зависит не только от скорости потока, но и от его плотности, зависящей от концентрации твердой фазы. Поэтому во всех случаях, когда эта концентрация не известна или, когда она меняется во времени, нужно иметь еще и преобразователь плотности потока. Именно с такими условиями приходится иметь дело в газожидкостных потоках.

3. ОСНОВЫ ДВИЖЕНИЯ СРЕДЫ ЧЕРЕЗ ШТУЦЕР

3.1. Движение однофазного потока

Проблема разработки и модернизации методов и устройств для измерения расхода многофазных сред не потеряла своей актуальности. В нефтегазовой промышленности очень часто имеет место поток флюида через различные ограничители, в частности, погружные или поверхностные штуцеры.

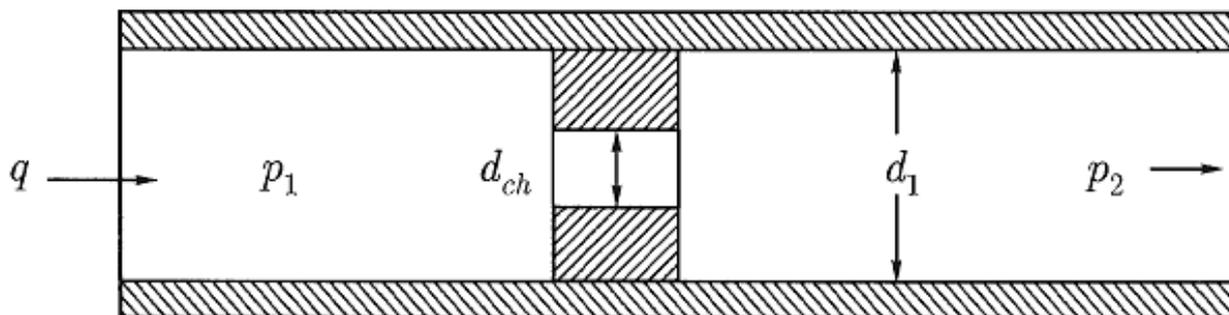


Рисунок 9. Схематичное изображение штуцера. [5]

Штуцеры предназначены для контроля дебитов или давления. Обычно они имеют закругленное входное отверстие и достигают в длину нескольких сантиметров. Располагаются штуцеры чаще всего вблизи устья для контроля дебита и/или давления и имеются в большинстве добывающих скважин. Известно, что если отношение давлений после и до штуцера $y = \frac{p_2}{p_1}$ достигает определенную величину, то поток, проходящий через штуцер, достигает скорости, равной скорости звука. При дальнейшем уменьшении y массовый расход остается практически неизменным. Это явление имеет место как в случае однофазного потока газа, так при определенных в определенных условиях и для многофазного потока при известной скорости звука (рисунок 9). [5]

В принципе, зная геометрические параметры штуцера, можно определить характеристики многофазного потока, протекающего через эту преграду, в частности установить условия перехода из докритического течения в критическое (рисунок 10). [5]

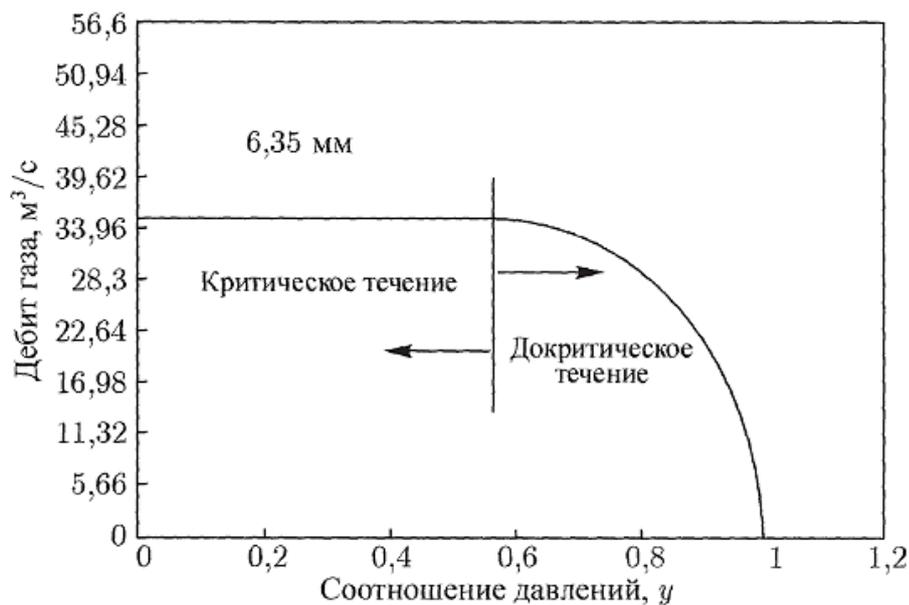


Рисунок 10. Зависимость потока, протекающего через штуцер от y . [4]

Полученные результаты зависят от значения отношения давлений и от значения скорости звука в многофазном потоке.

3.2. Многофазный поток

Для определения характеристик многофазного потока, протекающего через штуцер, необходимо в первую очередь установить условия, соответствующие границе перехода из докритического течения в критическое. Сделать это гораздо труднее, чем для однофазного потока газа. Полученные результаты зависят от коэффициента критического давления и от значения скорости звука многофазного потока.

Существует несколько методов, предложенных разными авторами, предназначенных для прогнозирования границ критического течения для многофазного потока.

Эшфорд и Пиерс получили уравнение для общего дебита многофазной смеси, приняв следующие допущения: через преграду (устройство внутри трубопровода) протекает адиабатический поток, жидкость является несжимаемой, не происходит ее испарения в штуцере, а смесь является однородной. [4]

Из рис.11 видно, что при значении, равном $R = 10 \text{ м}^3/\text{м}^3$, границе критического потока соответствуют те же значения y_c , что и для однофазного потока газа (Ср. рисунки 11 и 10). Однако меньшим значениям R соответствуют гораздо более низкие значения y_c .

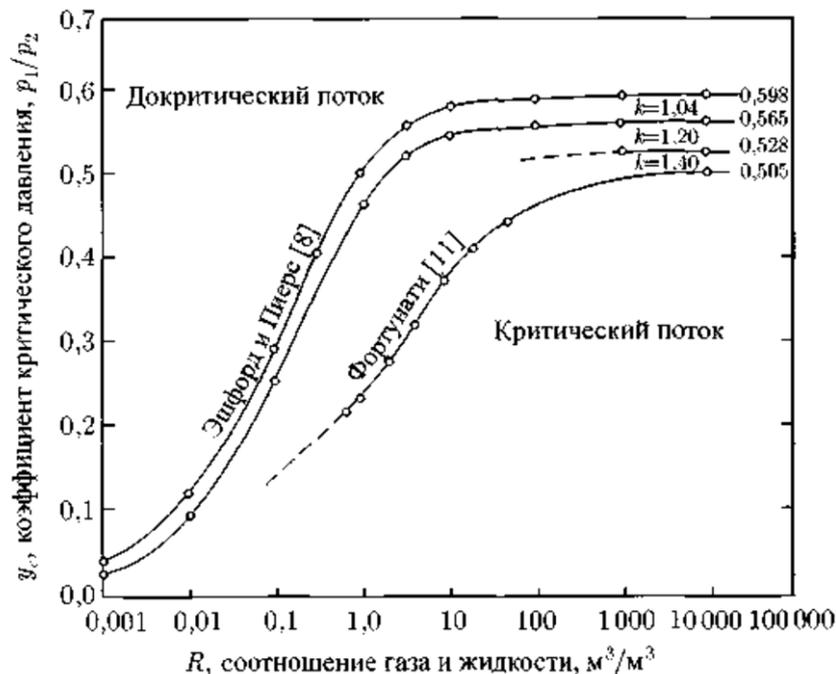


Рисунок 11. Корреляции для границ критического многофазного потока через штуцера. [4]

Фортунати предложил эмпирический метод исследования течения многофазного потока через штуцер. Он рассматривал смесь как однородную среду, доказав обоснованность подобного допущения для значений скоростей, не превышающих 10 м/с, когда число Фруда для смеси больше 600. Опираясь на экспериментальные данные, Фортунати построил диаграмму (рисунок 12), с помощью которой можно определить переходную границу между критическим и докритическим течением. [4]

Зная реальную скорость смеси и давление до штуцера, по уравнению можно найти скорость смеси:

$$v = v_F \left(\sqrt{\frac{P_2}{P_{2F}}} \right)^\eta \quad (7)$$

$$\eta = (1 - \lambda_{g2}^3)^{0,38} \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8) v_F – реальная скорость смеси до штуцера; P_{2F} , P_2 – давление до и после штуцера; λ_{g2} – содержание газа.

Из сравнения рисунков 11 и 12 видно, что граница между критическим и докритическим течением, рассчитываемая по методу Фортунати, близка с границей, которую рассчитали Эшфорд и Пиерс.

Уоллис получил выражение для расчета скорости звука в однородной смеси:

$$v_m = \left[(\rho_g \lambda_g + \rho_l \lambda_l) \left(\frac{\lambda_g}{\rho_g v_g^2} + \frac{\lambda_l}{\rho_l v_l^2} \right) \right]^{-0,5} \quad (9)$$

где λ_g , λ_l – содержание газа и жидкости; ρ_g , ρ_l – плотности газовой и жидкой фазы; v_g , v_l – скорости газовой и жидкой фазы.

Значение скорости звука в однородной смеси в различных случаях может быть гораздо ниже звуковой скорости любой фазы

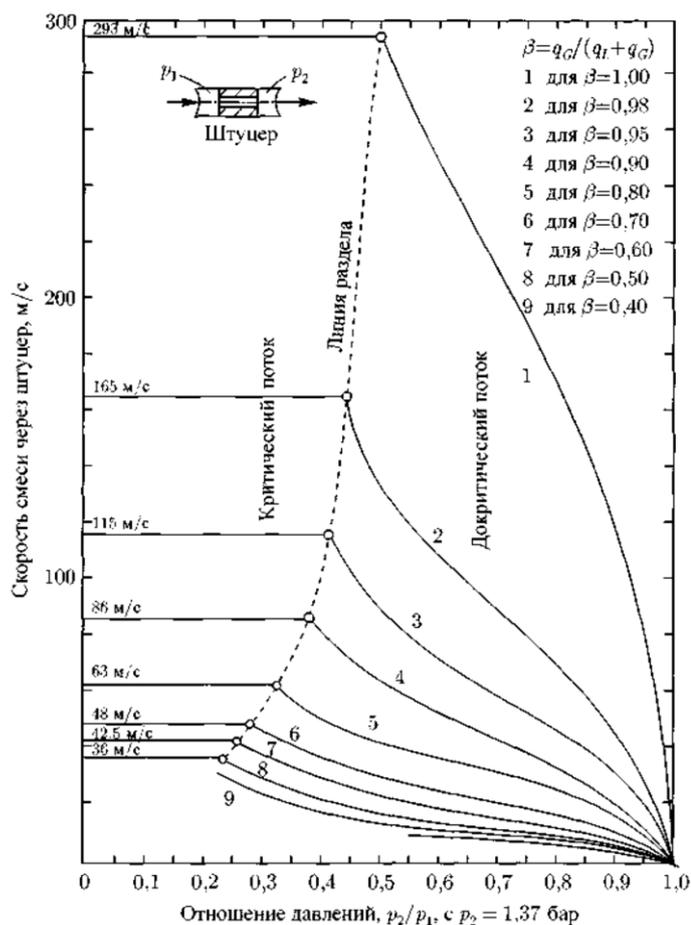


Рисунок 12. Скорость смеси для критического и докритического потока по Фортунатти. [4]

Основные формулы для малых дозвуковых скоростей, лежащие в основе работы расходомера, имеют вид:

$$q_m = const \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (10)$$

$$q_0 = const \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (11)$$

где q_m и q_0 — массовый и объемный расходы соответственно, $const$ - практически постоянная величина в некотором диапазоне чисел Рейнольдса, зависящая, в основном, от геометрических размеров и типа сужающего устройства $\Delta P = (P_1 - P_2)$ — перепад давления при прохождении потока через стандартную диафрагму (или сопло Вентури); ρ — плотность (смеси), либо известная, либо рассчитанная по уравнению состояния, либо неизвестная. Если приведенная плотность газообразной фазы много меньше жидкой, а масса жидкой фазы η в многофазной смеси не превышает 30 %, то можно измерить расход без привлечения расчетных данных для плотности смеси по уравнению состояния. [5]

Скорости легкой и тяжелой фаз при течении смеси через стандартную диафрагму несущественно отличаются друг от друга, так как диафрагма имеет короткий участок сужения. В этом случае, в ограниченной области значений $\eta \leq 0,3$ плотность смеси связана с плотностью легкой фазы соотношением:

$$\rho_c \approx \frac{\rho_l}{1-\eta} \quad (12)$$

и зависимость массового расхода преобразуется к виду:

$$q_{mл} = const \sqrt{2\rho_l\Delta P_d} \quad (13)$$

Из данной формулы следует, что перепад давлений на диафрагме ΔP_d (при сделанных допущениях и в ограниченной области значений η характеризует лишь массовый расход легкой фазы. Этот вывод, подтвержденный экспериментально, объясняется тем, что при принятом равенстве скоростей легкой и тяжелой фаз энергия на ускорение тяжелой фазы не затрачивается. [5]

Таким образом, при использовании стандартной диафрагмы расход легкой фазы (сухой части газа) может быть определен по уравнению (11).

При известной массовой концентрации тяжелой фазы η , полный расход смеси вычисляют по формуле:

$$q_m = \frac{q_{mЛ}}{1-\eta} \quad (14)$$

а расход тяжелой фазы по формуле:

$$q_{mТ} = q_m \eta = q_{mЛ} \frac{\eta}{1-\eta} \quad (15)$$

Если величина η неизвестна или меняется в процессе измерений, то необходимо дополнительно измерять перепад давления на трубке или сопле Вентури ΔP_B . Отношение $\Delta P_B / \Delta P_D$ характеризует часть энергии потока, затрачиваемую на ускорение тяжелой фазы и соответственно пропорционально η . Из опытов известно, что справедливо соотношение:

$$B \frac{\eta}{1-\eta} = \frac{\Delta P_B}{\Delta P_D} - 1 \quad (16)$$

Обозначим

$$\frac{\Delta P_B}{\Delta P_D} - 1 = A \quad (17)$$

тогда

$$\eta = \frac{A}{A+B} \quad (18)$$

Величина B зависит от свойств тяжелой фазы и геометрии применяемых сужающих устройств. Коэффициент B может быть определен при калибровке расходомера. Сигналы с датчиков перепада давления, давления и температуры поступают в ИВК, где они обрабатываются по соответствующей программе. [5]

3.3. Алгоритм расчета течения в штуцере

Шабаровым А. Б. и др. была разработана методика расчета параметров газоконденсатной смеси (ГКС) в пласте [47], включающая в себя несколько блоков, один из которых позволяет рассчитать расход ГКС, проходящей через штуцер, установленный на устье скважины. Мы применили данный алгоритм для расчета расхода газожидкостной смеси (воздух + вода), исходя из условий нижеописанного эксперимента с целью дальнейшего сравнения эмпирических и рассчитанных данных. Схема трубопровода с штуцером приведена на рисунке 14.

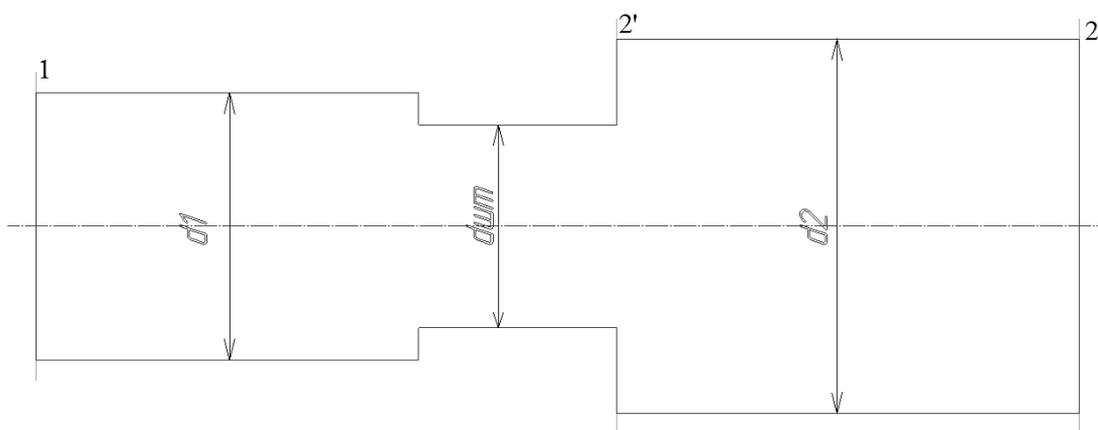


Рисунок 14. Схема трубопровода с штуцером.

d_1, d_2 – внутренние диаметры трубопровода; d_{um} – диаметр отверстия штуцера.

Методика расчёта содержит следующие пункты.

А. Давление и скорость P_2, v_2 в трубе.

Расчет в сечении 1, начальные данные: $\rho_1, \rho_{q1}, \rho_{e1}, \mathcal{M}_{q1}, \mathcal{M}_{e1}, \mathcal{T}_1$.

В нулевом приближении $\rho_2^0 = \rho_1, \rho_{q2}^0 = \rho_{q1}, \rho_{e2}^{(0)} = \rho_{e1}$ – плотности фаз при входе в трубу.

Скорость ГКС в сечении 2:

$$v_2 = \frac{1}{\rho_2 s_2} (\rho_1 v_1 s + G'), \quad \text{где } s = \frac{\pi d^2}{4} \quad (19)$$

где G' – расход ГКС; ρ – плотность ГКС; s – площадь поперечного сечения.

Средняя плотность [кг/м³] ГКС на участке $(i, i+1)$:

$$\rho = \frac{2\rho_1\rho_2}{\rho_1+\rho_2} \quad (20)$$

Объемный расход ГКС в сечении 2 [м³/с]:

$$Q_2 = \frac{G_1+G'}{p_2} \quad (21)$$

Объемный расход газа и конденсата:

$$Q_{g2} = \frac{p_{e2}-p_2}{p_{e2}-p_2} Q_2, Q_{L2} = Q_2 - Q_{g2} \quad (22)$$

Объемное газосодержание в данном сечении:

$$\alpha_g = \frac{Q_{g2}}{Q_2} \quad (23)$$

Число Рейнольдса по газу и конденсату:

$$Re'_g = \frac{v_1 d \rho_{g1}}{\mu_{g1}}, Re'_L = \frac{v_1 d \rho_{L1}}{\mu_{L1}} \quad (24)$$

Коэффициент трения:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,067 \left(\frac{158}{Re'_g} + \frac{2\Delta}{d} \right)^{0,25} \quad (25)$$

при $Re_g < \frac{500d}{\Delta}$ иначе $0,067 \left(2,136 \frac{\Delta}{d} \right)^{0,2}$ – коэффициент трения на стенке при турбулентном течении $Re'_g \geq 10^4$.

$$\rho_* = \frac{\rho_{g1}}{\rho_{L1}} \quad (26)$$

Число Фруда и число Этвеша:

$$Fr = \frac{v_1^2}{gd}, Et = \frac{gd^2 \rho_{L1} (1-\rho_*)}{\sigma_1} \quad (27)$$

Коэффициент потерь давления с весовыми коэффициентами для $\lambda_{\text{тр}}$ и $\lambda_{\text{ГКС}}$

$$\lambda' = \alpha_{\text{тр}} \cdot \lambda_{\text{тр}} + (1 - \alpha_{\text{тр}}) \cdot \lambda_{\text{ГКС}} \quad (28)$$

Коэффициент потерь давления с учетом идентификации:

$$\lambda = k_\lambda \cdot \lambda' \quad (29)$$

где $k_\lambda = 1$, если нет данных или k_λ вычисляют по измеренным P_1 и P_2 из уравнения Бернулли.

Работа сил трения на участке $(i, i+1)$ длиной l :

$$l_{\text{тр}} = \frac{P_1 - P_2}{\rho} + \alpha_k \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

$$k_\lambda = \frac{l_{\text{тр}} \cdot 2d}{\lambda' \cdot l \cdot v_1^2} \quad (30)$$

$$l_{\text{тр}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_1^2}{2}$$

Далее находим давление [Па] ГКС при выходе из участка $x = x_{i+1}$:

$$P_2 = P_1 + \rho \cdot \left[\alpha_k \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) - l_{\text{тр}} \right] \quad (31)$$

Б. Скорость и давление p_2 и v_2 (штуцер).

Объемные расходы газа и конденсата и объемная доля газа:

$$Q_{g1} = \frac{G_{g1}}{\rho_{g1}}$$

$$Q_{c1} = \frac{G_{c1}}{\rho_{c1}} \quad (32)$$

$$\alpha_g = \frac{Q_{g1}}{Q_{c1} + Q_{g1}}$$

Критический расход газа через – штуцер при $\alpha_g = 1,0$

$$G_{\text{кр}g} = \left[\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \right] \frac{p_2'^*}{\sqrt{R_g T_1^*}} \frac{\pi d_{\text{шт}}^2}{4} \quad (33)$$

$$T_1^* = T_1 + \frac{v_1^2}{2c_p}, \quad p_1^* = \frac{p_1}{\left(\frac{T_1}{T_1^*} \right)^{\frac{k}{k-1}}}, \quad p_2'^* = p_1^k - 0,5 \left(1 - \frac{d_1^2}{d_{\text{шт}}^2} \right) \rho_1 \frac{v_1^2}{2} \quad (34)$$

Критическое отношение давлений:

$$\beta_{\text{кр}} \equiv \left(\frac{p_2'}{p_2'^*} \right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (35)$$

Давление в сечении 2' штуцера (в первом приближении):

$$p_2' = p_1^* \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{G'^2}{C^2}} \right) \quad (36)$$

Где $G' = \frac{G}{G_{\text{кр}g}}$, $C^2 = \frac{1}{(1-\beta_{\text{кр}})\beta_{\text{кр}}}$, если $\beta \equiv \frac{p_2'}{p_2'^*} \leq \beta_{\text{кр}}$, то $G' = 1,0$.

Уточненное значение p_2' находится с помощью итераций (если $\beta \equiv \frac{p_2'}{p_2'^*}$)

Газодинамическая функция расхода (показатель адиабаты $k = 1,275$):

$$q(\lambda'_2, k) = \frac{G_g \sqrt{R_g T_1^*}}{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{1-k}} \cdot \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \cdot p_2' \cdot \frac{\pi d_{шт}^2}{4}}$$

$$p_2' = p_2'^* \left[\frac{q(\lambda'_2, k)}{\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \sqrt{\left(1 - \left(\frac{p_2'}{p_2'^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}} \right]^k \quad (37)$$

$$q(\lambda', k) = \left[\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \right] \sqrt{1 - \left(\frac{p_2'}{p_2'^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} \left(\frac{p_2'}{p_2'^*}\right)^{\frac{1}{k}}}$$

Критическое отношение давления для ГКС (аппроксимация кривых Фортунати) (при $\alpha_g \geq 0,9$):

$$\beta_{кр ГКС} = 0,4 + 10(\beta_{кр} - 0,4)(\alpha_g - 0,9)$$

$$\alpha_g = 0,9; \beta_{кр ГКС} \cong 0,4$$

$$\alpha_g = 1; \beta_{кр ГКС} = \beta_{кр} \quad (38)$$

Критический расход ГКС ($\alpha_g \geq 0,9$):

$$\bar{x} = (\alpha_g - 0,9) \cdot 10,0$$

$$\bar{y} = 0,155\bar{x} + 0,5\bar{x}^3$$

$$\bar{m} = 0,706\bar{y} + 0,294$$

$$G_{кр ГКС} = G_{кр} \cdot \bar{m} \quad (39)$$

Если $G \geq G_{кр ГКС}$, то $G = G_{кр ГКС}$ и повторный расчет скважины с расходом $G = G_{кр ГКС}$. Если $G < G_{кр ГКС}$, то $G_g = G$, $R_g = R_{ГКС}$ и уточнение $q(\lambda'_2, k)$ по и P_2' .

Расчет давления в сечении 2 (рисунок 14), если $G < G_{кр ГКС}$, то

$$P_2^* = P_1'^* - k_{P_{шт}} \cdot \left(\frac{d_2^2}{d_{шт}^2} - 1\right)^2 \cdot \rho_2' \cdot \frac{(v_2')^2}{2} \quad (40)$$

если $G = G_{кр ГКС}$, то

$$P_2^* = P_{уз}^* - k_P \cdot \lambda \cdot \frac{l_{тр}}{d_{тр}} \cdot \rho_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} \quad (41)$$

В первом приближении $P_2 = P_2^*$, где $k_{P_{шт}}$ – идентификационный коэффициент потерь давления на штуцере, k_P – идентификационный коэффициент потерь давления в трубопроводе (в первом приближении $k_P \approx 1,0$ и $k_{P_{шт}} \approx 1,0$); $P_{уз}^*$ – давление на кустовом узле.

Статическое давление в сечении 2 (рисунок 14):

$$\lambda_2 = \frac{v_2}{\sqrt{\frac{2k}{k+1} \cdot RT_2^*}}$$

$$\pi_2(\lambda_2, k) = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_2^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (42)$$

$$P_2 = \pi_2(\lambda_2, k)P_2^*$$

Подробный расчет содержится в другом блоке программы, в нем описан порядок определения теплофизических параметров ГКС (Приложение А). На рисунке 15 показаны рассчитанные по изложенной выше методике зависимости расхода от отношений давления при разных значениях газосодержания.

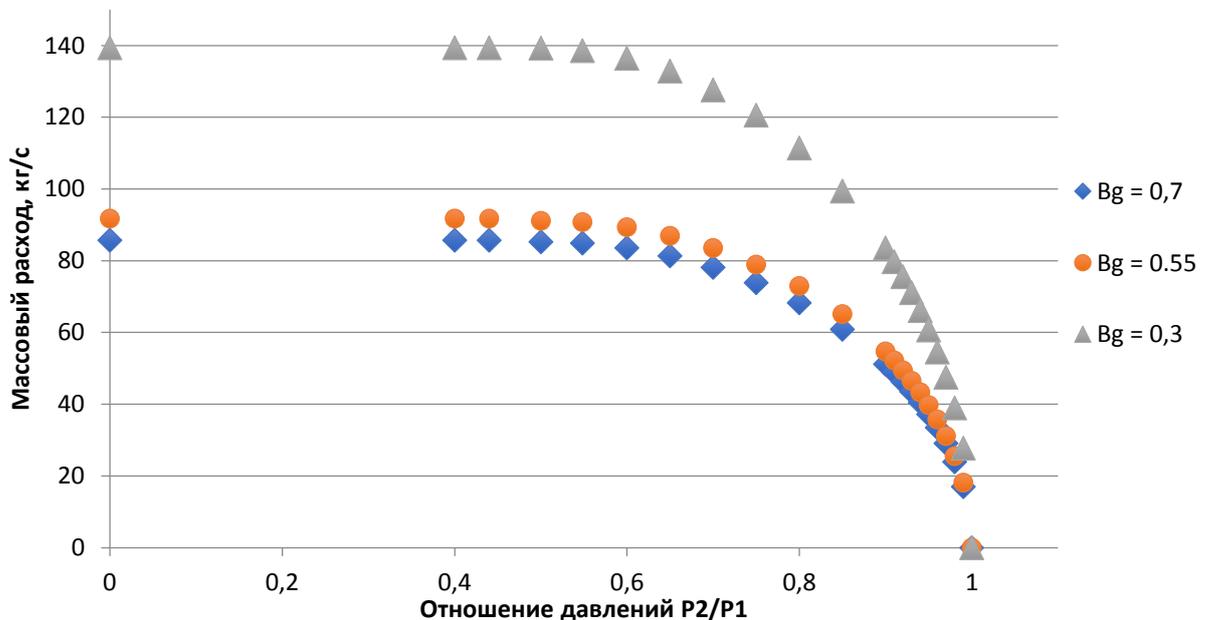


Рисунок 15. Расчетно-теоретические зависимости расхода от отношения давлений.

4. ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА

4.1. Описание стенда

Экспериментальное исследование расхода двухфазного потока через СУ осуществлялось на специальном стенде, позволяющем создавать необходимый перепад давлений на СУ, а также наблюдать за характером потока жидкости в газе с помощью прозрачного участка трубы. Фото стенда изображено на рисунке 16.

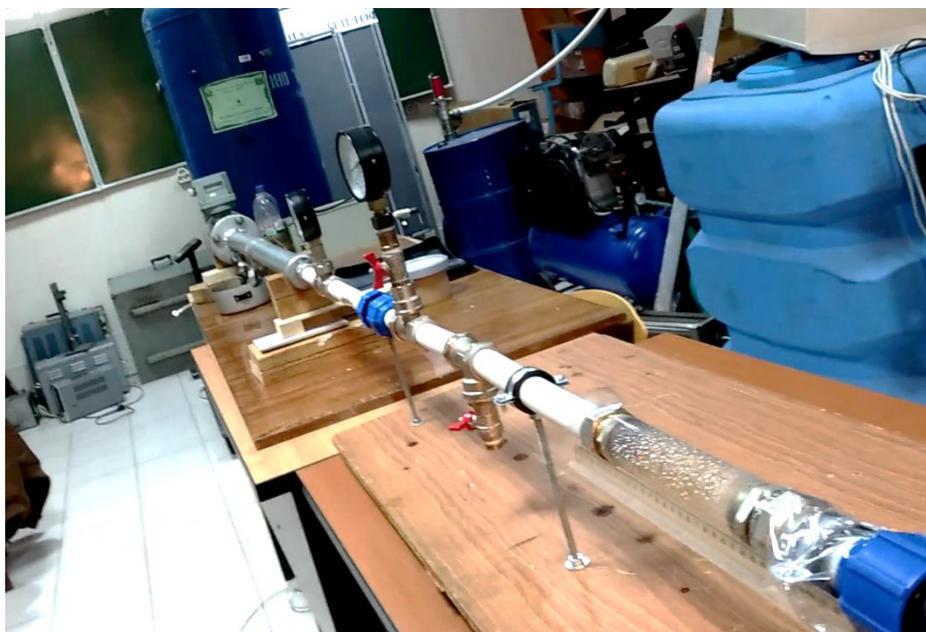


Рисунок 16. Фото стенда.

Воздух из компрессора поступает в участок трубопровода, на котором происходит смешивание с водой, предварительно пройдя через СУ необходимое для поддержания постоянного давления.

Вода подается через специальный патрубок расположенный в центре трубы. Для возможности регулировки количества воды, поступающей в трубопровод, были использованы специально изготовленные форсунки, распыляющие воду мелкими каплями.

Газ с частицами воды проходит через штуцер до и после которого производится измерение давления. Схема стенда изображена на рисунке 17.

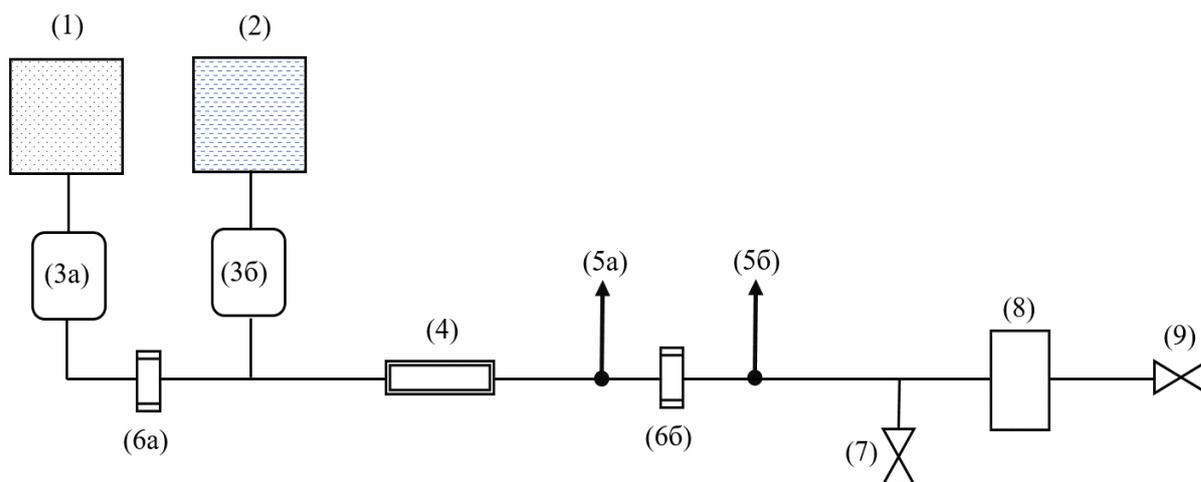


Рисунок 17. Схема измерительной установки.

1 – компрессор; 2 – бак с водой; 3а, 3б – устройства для контроля и регулирования давления; 4 – прозрачный участок трубопровода; 5а, 5б – точки измерения давления; 6а – штуцер для стабилизации расхода; 6б – штуцер, используемый для получения экспериментальных данных; 7 – дренажный вентиль; 8 – счетчик газа; 9 – вентиль для регулирования выходного давления.

Далее объем воздуха измеряется счетчиком газа, а затем выбрасывается в атмосферу. Вода из установки отводится через дренажный вентиль, после чего определяется ее объем.

Для измерения атмосферного давления используется барометр aneroid. Температура контролируется при помощи термометра контактного. Продолжительность проведения измерения фиксируется секундомером.

4.2. Методика проведения измерений и получения качественных и количественных данных

Для получения качественных сведений о характеристиках потока, проводились наблюдения через прозрачный участок трубопровода, а также фото и видео съемка.

Вода была окрашена красителем, что дало возможность наблюдать за движением частиц жидкости в потоке воздуха. На время проведения данного этапа эксперимента участок после штуцера 6б (рисунок 17) отсоединялся от остальной установки. Регулировка давления воды, поступающей в трубопровод позволяет оптимально настроить поток.

Для начала проведения эксперимента на вход установки подается избыточное давление $p_{\text{изб}} = 200$ кПа, контролируемое манометром P_1 , для плавного заполнения газом трубопровода. Давление P_1 в течение всех измерений остается постоянным.

Далее производится подача воды и совершается регулировка выходного давления вентилем 9 (рисунок 17) измеряемого манометром P_2 . Фиксируются показания счетчика газа перед началом измерения и по его завершению. Таким образом проводится несколько серий измерений при разных значениях давления P_2 . Планируемый диапазон изменения отношений давления P_2/P_1 составил от 0,34 до 0,6.

Все полученные данные заносятся в протокол измерений. Внешний вид протокола приведен в Таблице 1.

Температура окружающего воздуха $t = 18,3$ °С;

Атмосферное давление $p_a = 102,4$ кПа;

Таблица 1. Протокол измерений.

№ п/п	P1, кПа	P2, кПа	T, с	Показания счетчика		Vв, л
				V _{нач} , м ³	V _{кон} , м ³	
1	200	3,4	1261	0,3	0,9	13,1
2	200	3,6	1184	0,9	1,5	12,8
3	200	3,1	638	1,5	1,8	6,8

4.3. Обоснование выбора штуцера

Для проведения экспериментов в качестве СУ в установке был использован штуцер с диаметром канала $d = 2,16$ мм длиной $l = 12,1$ мм. Штуцер с данными

геометрическими параметрами выбран на основании результатов, изложенных в работе А. Брянцева. [] Им была получена расходная характеристика для аналогичного штуцера при течении однофазного потока. (См рисунок 18).

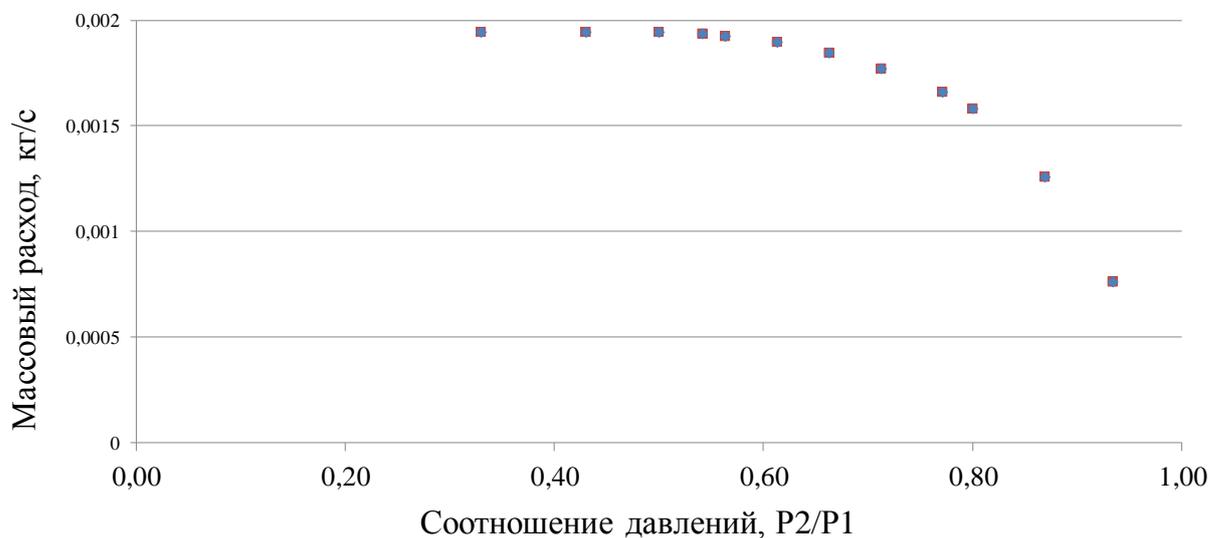


Рисунок 18. Расходная характеристика штуцера с параметрами $d = 2 \text{ мм}$, $l = 12 \text{ мм}$ при $P_1 = 300 \text{ кПа}$. []

Ранее, на основе экспериментальных данных было установлено, что штуцеры с относительной длиной $\frac{l}{d}$ от 5 до 7 являются наиболее подходящими в качестве регуляторов расхода и поддержания режимных параметров на входе и выходе технологических установок. []

4.4. Обработка экспериментальных данных

Целью проведения экспериментов было получение зависимостей между массовым расходом двухфазного потока и перепадом давления на штуцере.

Нами были получены экспериментальные данные об объемном расходе воздуха и воды, температуре, давлении и разности давлений на рабочем участке горизонтального трубопровода. Для получения массового расхода необходимо рассчитать плотность воздуховодяной смеси. Для этого используется понятие приведенной плотности:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V} \quad (43)$$

Где m_i – масса i -ой фазы, V – объем смеси.

В свою очередь отношение объема, занимаемого i -ой фазой V_i , к объему смеси V есть объемная доля i -ой фазы.

$$\alpha_i = \frac{V_i}{V_0} \quad (44)$$

$$\rho_i = \rho_i^0 \alpha_i \quad (45)$$

Истинная плотность компонентов смеси ρ_i^0 известна из справочной литературы. [10] Плотность смеси равняется сумме приведенных плотностей фаз [46]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{V} = \sum_{i=1}^N \rho_i \quad (46)$$

Учитывая найденную плотность смеси можно определить массовый расход:

$$G = Q\rho \quad (47)$$

Характеристики стенда позволяли провести эксперимент в диапазоне отношения давлений $y = \frac{P_2}{P_1}$ от 0,34 до 0,53. Для построения экспериментальных диаграмм были использованы серии измерений при трех различных концентрациях жидкой фазы.

4.5. Результаты исследований

Наибольшей информативностью для оценки характера движения смеси воздуха и воды через штуцер обладают расходные характеристики. В результате проведенных в работе экспериментов удалось получить набор точек, при обработке которых были построены три зависимости массового расхода от перепада давления на штуцере.

Основываясь на теории движения однофазного потока через СУ, было сделано предположение о том, что характер течения многофазного потока имеет аналогичные особенности, а именно, ниже некоторого значения « y » значение массового расхода остается практически постоянным. Для подтверждения данного

предположения необходимо построение экспериментально полученных расходных характеристик.

Перед получением экспериментальных данных необходимо было убедиться в том, что при смешивании воды с воздухом образуется поток дисперсной структуры. В ходе проведения экспериментов с набором форсунок, различающихся диаметрами выходных отверстий, а также при помощи изменения давления воды на входе в трубопровод, удалось подобрать оптимальный режим смешивания.

При использовании форсунок с большим диаметром наблюдалась следующая ситуация. Через несколько секунд после запуска на стенках прозрачного участка трубопровода оседали крупные капли воды и с течением времени скапливалась в нижней части трубы (рисунок 19).

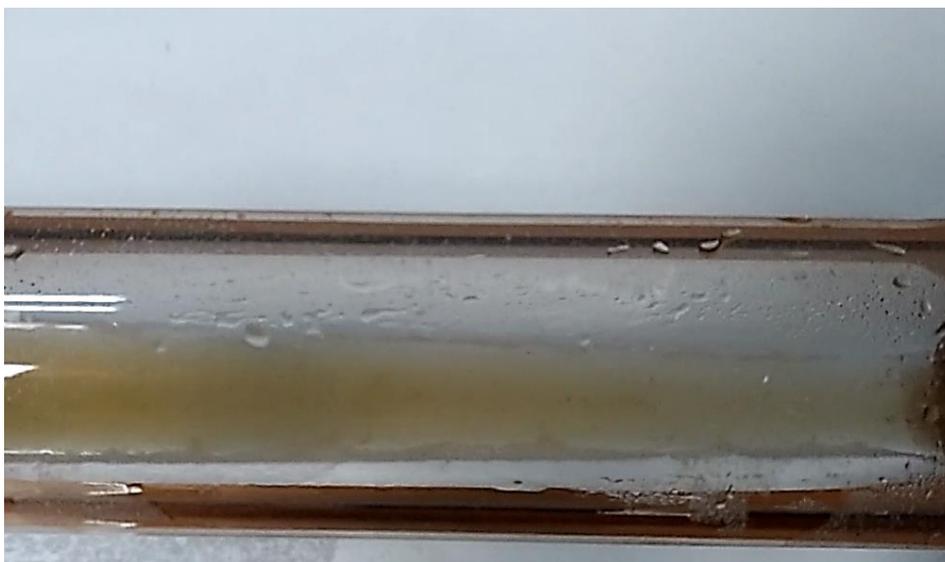


Рисунок 19. Фото прозрачного участка трубопровода с раздельным течением фаз.

В свою очередь, регулировка давления показала, что при давлении воды, близком к давлению воздуха в трубопроводе, скорость капель, поступающих в трубу низкая. Вследствие этого наблюдалось накопление воды в нижней части трубопровода и отдельное течение воды и воздуха. В результате было решено использовать форсунки с меньшим диаметром, а давление воды устанавливать приблизительно на 100 кПа выше давления воздуха в трубопроводе. Соответственно при данных условиях можно было наблюдать оседание мелких капель на стенках и отсутствие расслоения фаз (рисунок 20).

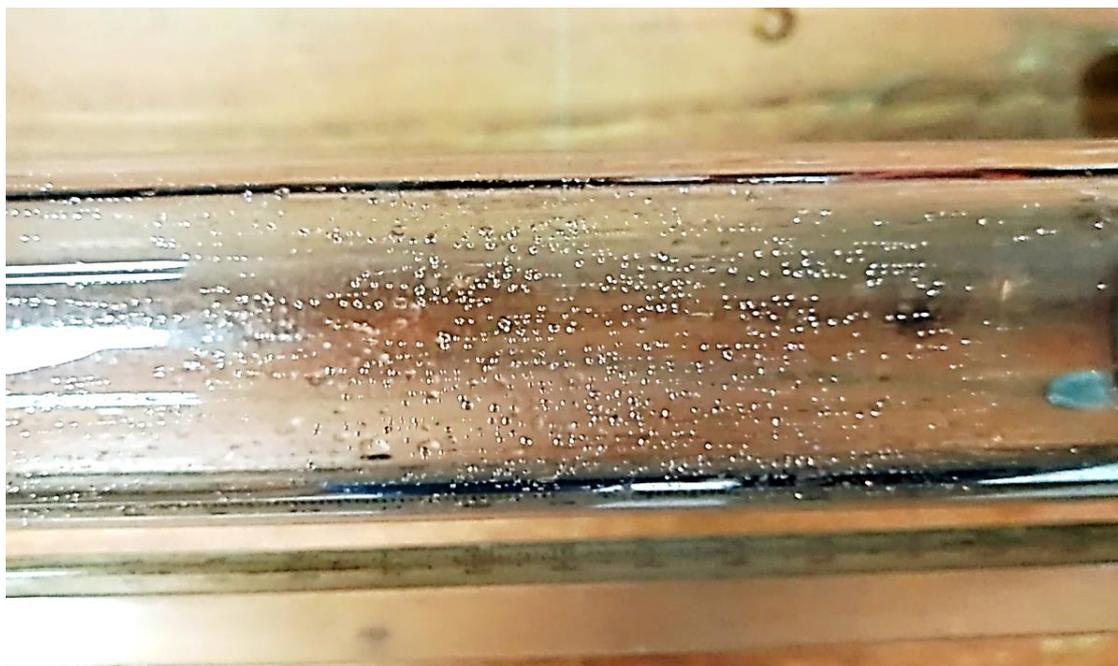


Рисунок 20. Фото прозрачного трубопровода, случай дисперсного потока.

Удалось зарегистрировать несколько точек с наиболее стабильными показаниями расхода, на основе которых были построены графики, подобные приведенным на рис. 21.

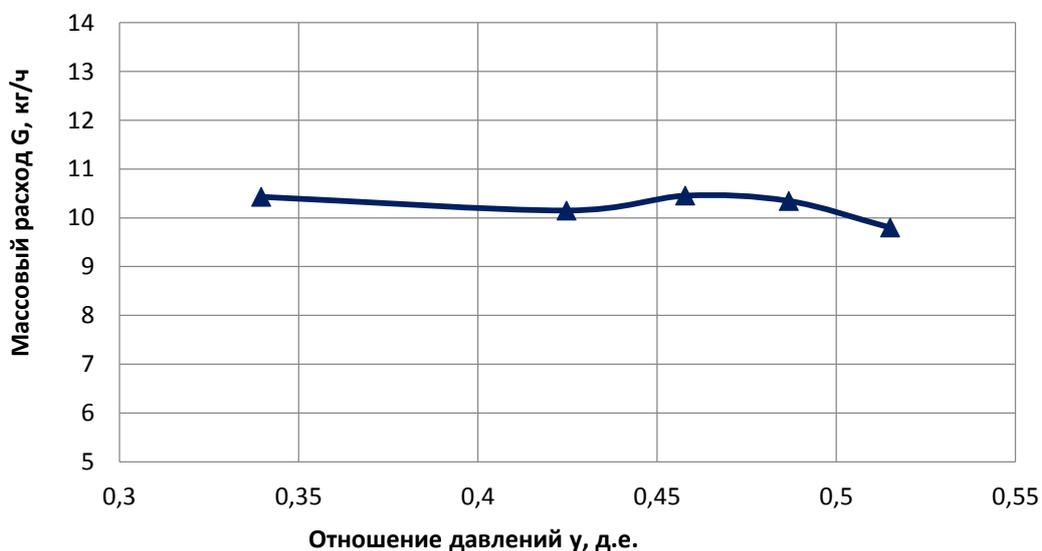


Рисунок 21. График зависимости массового расхода от отношения давлений при газосодержании $\beta_g = 0,98$.

Как видно из рисунка 21, существует практически прямолинейный участок, соответствующий постоянному расходу.

Объемное газосодержание β_g , для расходной характеристики, изображенной на рисунке 21, отвечает формуле

$$\beta_g = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (48)$$

Где V_g, V_l – объем газа и жидкости.

Начиная с точки, соответствующей отношению давлений $y = 0,53$ и выше, наблюдается уменьшение массового расхода. Действительно, при постоянном давлении P_1 и увеличении давления P_2 (и увеличении значения «у»), счетчик газа переставал реагировать на количество проходящего через него воздуха. Таким образом, можно сделать вывод об уменьшении расхода при увеличении значения «у».

В ходе дальнейших экспериментов удалось получить две зависимости, для объемных долей газа 0,95 и 0,92 (рисунок 22). Здесь также наблюдается характерный прямой участок, на котором расход остается постоянным и снижение расхода при значении y выше 0,5.

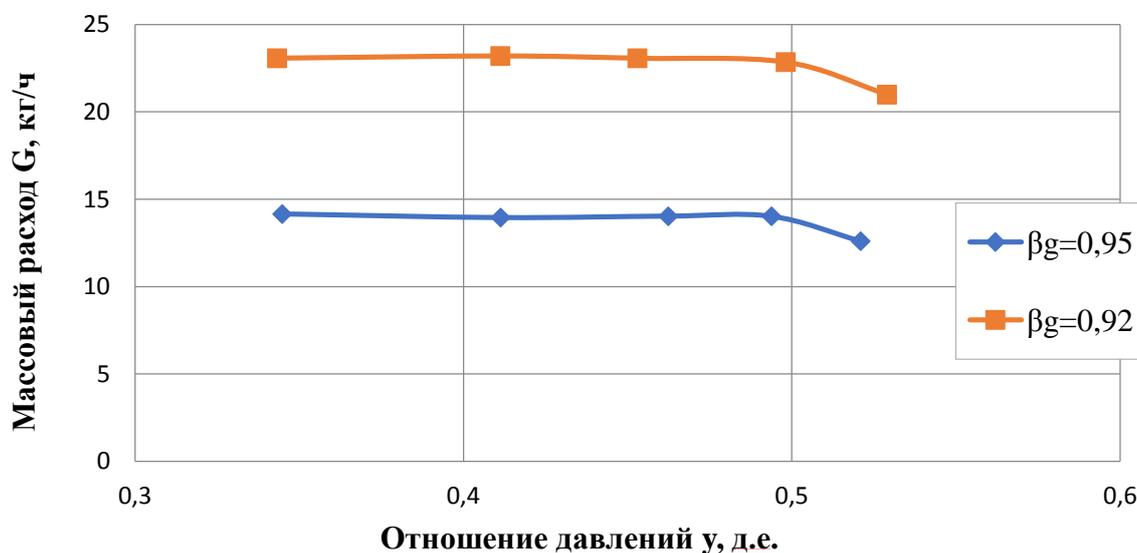


Рисунок 22. График зависимости массового расхода от отношения давлений при двух значениях газосодержания.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что с ростом содержания тяжелой фазы в смеси и, как следствие, плотности, происходит

увеличение массового расхода (рисунок 23) при одинаковом значении перепада давления на штуцере.

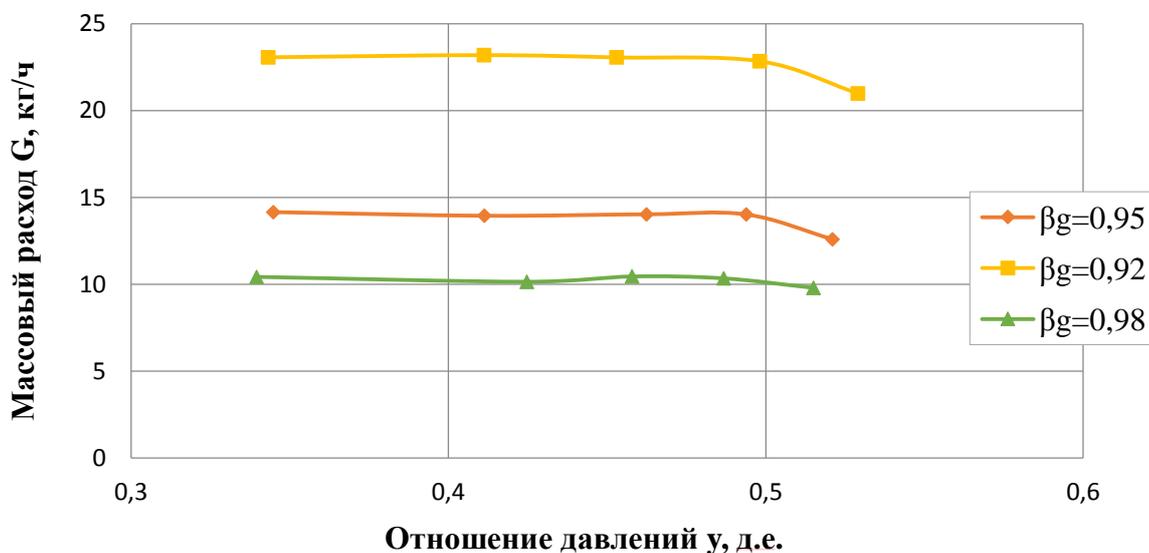


Рисунок 23. Зависимость массового расхода от отношения давления при различном газосодержании.

Из графика на рисунке 23 видно, что при не значительном уменьшении газосодержания происходит резкое увеличение массового расхода. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что массовый расход имеет довольно сильную чувствительность от газосодержания. График зависимости массового расхода от газосодержания показан на рисунке 24.

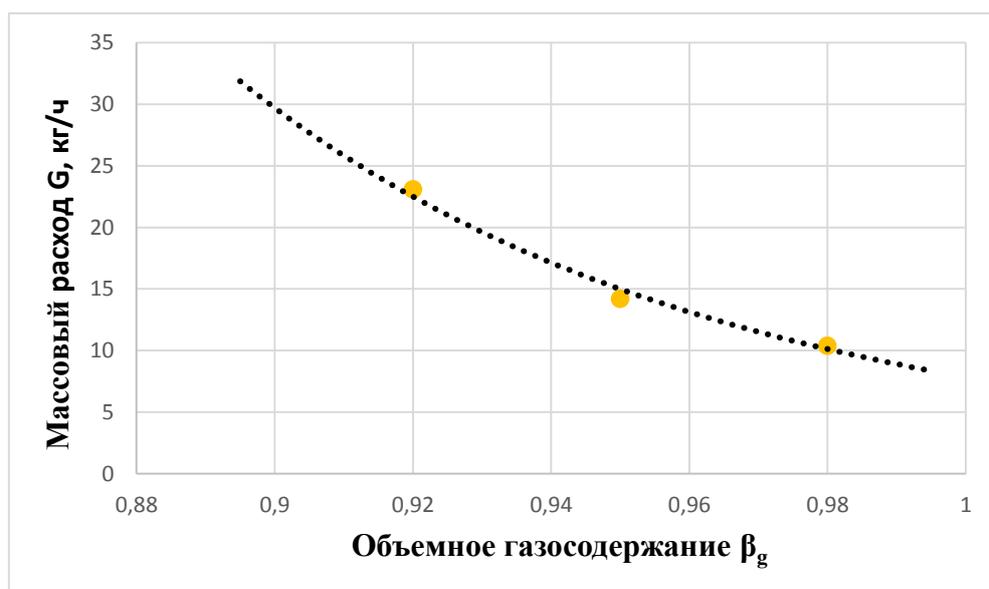


Рисунок 24. Зависимость массового расхода от газосодержания.

Возможно применение данной особенности для определения содержания жидкой фазы в потоке газа при известных дынных массового расхода, например, при использовании массового расходомера, без применения дополнительных средств.

4.6. Оценка неопределенности измерения расхода

Для оценки точности метода определения массового расхода была рассчитана расширенная неопределенность измерения. Она включает в себя три составляющих: неопределенность по типу А, неопределенность по типу В, стандартная суммарная неопределенность. [13, 49]

Неопределенность по типу А u_A представляет собой оценку путем применения статистических методов [13, 14]:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x)^2}{n(n-1)}} \quad (49)$$

Где x_i – среднее значение измеренной величины; x – измеренная величина; n – количество измерений.

Неопределенность по типу В – оценка составляющих способом отличным от статистического, например, по характеристикам прибора взятым из документации [25]:

$$u_B = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} \quad (50)$$

Соответственно, стандартная суммарная неопределенность вычисляется по формуле:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (51)$$

Найдем неопределенность измерения расхода по типу А. При проведении эксперимента производятся многократные измерения объема воздуха, объема воды и давления.

$$u_A = u_A^{Vg} + u_A^{Vl} + u_A^P \quad (52)$$

Для нахождения неопределенности по типу В были учтены погрешность определения объема газа и погрешности измерения давления согласно технической документации на средства измерений. Следует учесть, что на работу счетчика оказывает дополнительное влияние жидкая составляющая потока.

Таким образом, неопределенности по типу А и В составили 0,92 и 1,46 кг/ч. Пользуясь формулой (6.0) значение стандартной суммарной неопределенности равняется 1,73. Умножая данное значение на коэффициент охвата можно найти расширенную неопределенность. Для данного метода при расходе 23,1 кг/ч она составляет 3,46 кг/ч. Таким образом значение массового расхода можно записать следующим образом, $(23,1 \pm 3,5)$ кг/ч. В случае с массовым расходом 14,1 и 10,4 кг/ч, соответствующим двум другим зависимостям, расчет расширенной неопределенности производился аналогично и составил $(14,1 \pm 2,4)$ кг/ч и $(10,4 \pm 1,92)$ кг/ч.

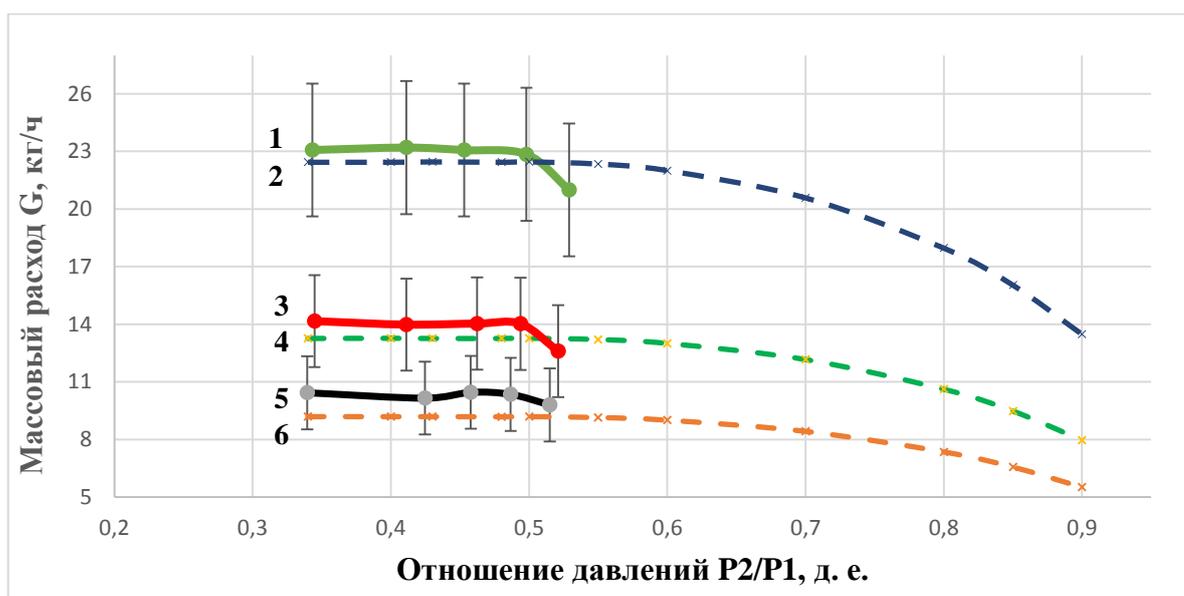


Рисунок 25. График сопоставления зависимостей с расширенной неопределенностью измерений.

1, 3, 5 – экспериментальные зависимости массового расхода от отношения давлений с обозначенными границами расширенной неопределенности; 2, 4, 6 – расчетные зависимости.

На рисунке 25 показан график, на котором для более удобной оценки дополнительно нанесена расширенная неопределенность измерений. Из данного

рисунка видно, что экспериментальные данные качественно согласуются с теорией, так как ни одна из зависимостей не выходит за границы неопределенности.

4.7. Сопоставление с расчетными данными

Для получения теоретических зависимостей была использована методика, описанная в главе 3 настоящей работы. На рисунке 26 изображены расчетные и экспериментальные данные.

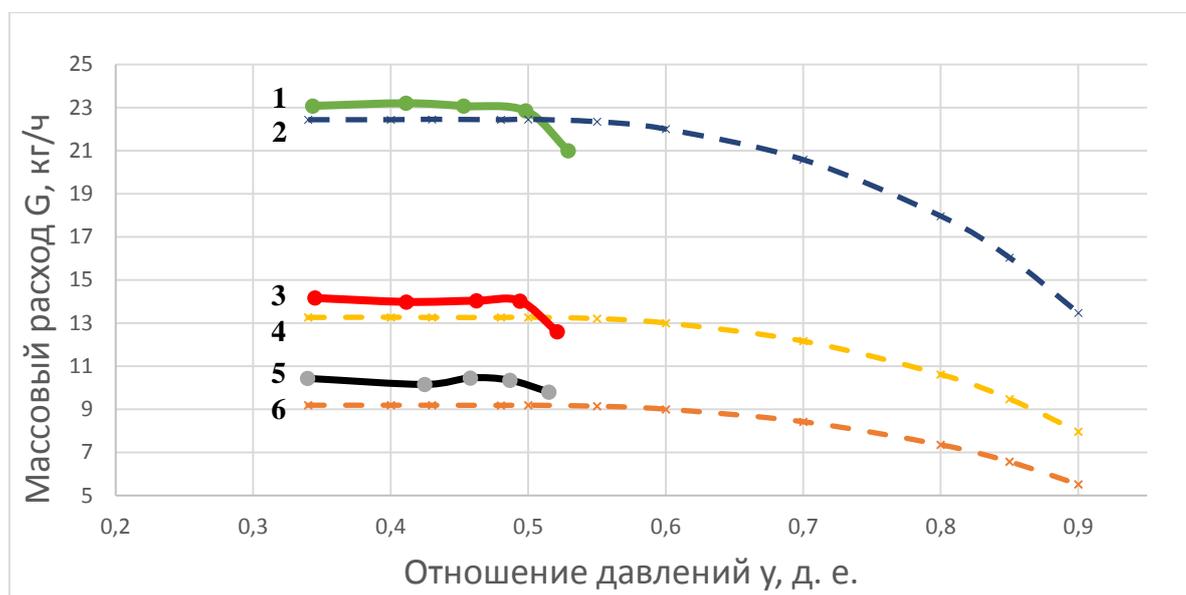


Рисунок 26. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей.

1, 3, 5 – экспериментальные зависимости массового расхода от отношения давлений; 2, 4, 6 – расчетные зависимости.

Из рис. 24 видно, что наблюдается качественное соответствие между расчётом и экспериментом в диапазоне значений « y », доступном на стенде. В частности, наблюдается прямолинейный участок с практически неизменным расходом. Вместе с тем, в отличие от теоретических кривых, на которых выше некоторого значения y происходит монотонное убывание расхода, в эксперименте наблюдался резкий спад расхода после значения $y = 0,5$. Так как характеристики установки не позволяли однозначно определить расход во всем диапазоне y нельзя с уверенностью говорить о том, что методика расчета является недостаточно

полной или вообще не пригодной при высоких значениях газосодержания. Это требует дальнейших исследований.

Можно сделать вывод, что штуцер может быть использован в качестве элемента многофазного расходомера для определения концентрации жидкой фазы, так как существует диапазон отношений давления, в котором расход остается постоянным и сильно зависящим от значения газосодержания. Полученные экспериментально граничные значения β , указывающее на изменение характера течения дисперсной смеси, близкие к 0,5 меньше таковых для однофазного газового потока и качественно соответствуют значениям, полученным Фортунатти и др.

На рисунке 27 показан график с результатами опытов Фортунатти описанных в книге Брилл Дж. [4] Фортунатти установил, что при различных концентрациях жидкой фазы в смеси скорость потока, проходящего через штуцер различна. При этом, ниже некоторого значения P_2/P_1 величина скорости остается постоянной.

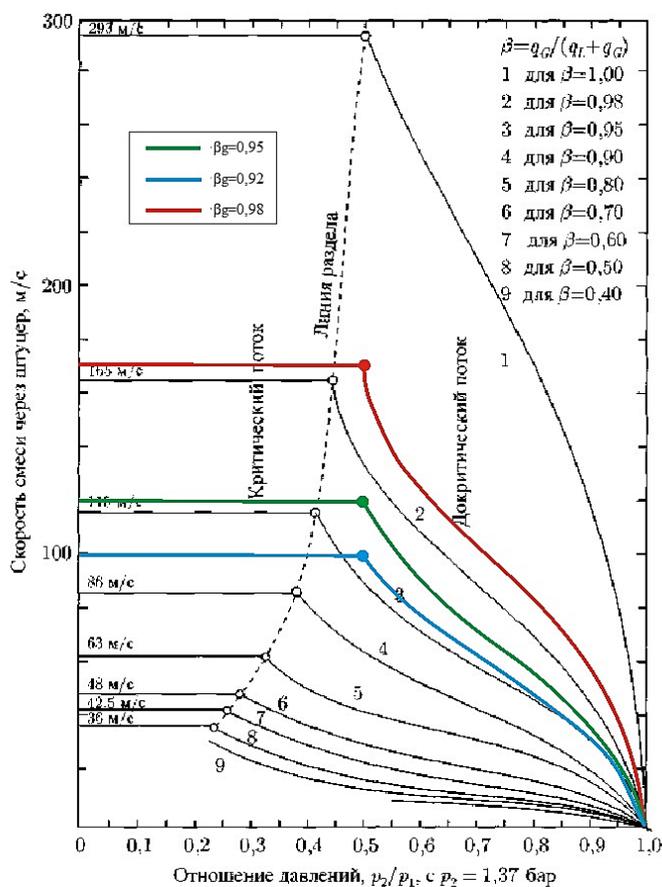


Рисунок 27. Сравнение результатов с опытами Фортунати.

Данное сходство является подтверждением работоспособности стенда и полученных с его помощью данных. А также дает основание для дальнейших более глубоких исследований и возможности применения результатов на практике при измерении многофазных потоков.

К сожалению, в книге нет подробной информации о параметрах штуцера использованного Фортунатти. Поэтому нет возможности количественно сравнить результаты, описанные выше. Однако, можно сказать о том, что как скорость в опытах Фортунатти, так и экспериментально определенный расход имеет постоянное значение при переходе к критическому режиму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведем результаты настоящего исследования.

1. В ходе выполнения работы была проведена модернизация измерительного стенда многофазных потоков с целью проведения экспериментов для изучения течения газожидкостного двухфазного потока через штуцер.
2. Определены геометрические и теплофизические характеристики форсунок, которые необходимо использовать для создания дисперсной структуры газожидкостного потока, а также параметры штуцера.
3. Проведена фото и видеосъемка текущего по трубопроводу дисперсного воздушно - водяного потока.
4. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости массового расхода двухфазной среды, текущей через штуцер, от перепада давления на нем. Эти данные свидетельствуют о высокой чувствительности значения массового расхода от газосодержания в критической области значений отношения давлений до и за штуцером.
5. Установлено, что штуцер может быть использован в качестве элемента многофазного расходомера для определения концентрации жидкой фазы.
6. Результаты расчетно-теоретического исследования течения многофазного потока по трубопроводу с внезапным сужением показали их качественное согласие с экспериментальными данными.
7. Экспериментально полученные граничные значения u , указывающее на изменение характера течения дисперсной смеси, близкие к 0,5, меньше таковых для однофазного газового потока и качественно соответствуют значениям, полученным Фортунатти и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Г. С. Практическая расходометрия в нефтяной промышленности / Г. С. Абрамов, А. В. Барычев // М.: ОАО ВНИИОЭНГ. – 2002. – 460 с.
2. Андронов И. В. Измерение расхода жидкостей и газов / И. В. Андронов // М.: Энергоиздат. – 1981. – 159 с.
3. Белозерцев В. Н. Основы механики жидкости / В. Н. Белозерцев, Е. В. Беляева, В. В. Бирюк // Самара. – Издательство СГАУ. – 2006. – 324 с.
4. Брилл Дж. П., Мукерджи Х. Многофазный поток в скважинах / Дж. П. Брилл, Х. Мукерджи // Москва-Ижевск. Институт компьютерных исследований. – 2006. – 384 с.
5. Вакулин А. А. Измерение расхода многофазного потока дисперсной структуры / А. А. Вакулин, Б. Г. Аксенов // Вестник ТюмГУ. – 2012. – № 4. – С. 42-46.
6. Вакулин А. А. Научно-испытательный стенд многофазных потоков / А. А. Вакулин, Е. В. Голубев, В. В. Котлов, А. Н. Лищук, С. Г. Никулин, Н. Б. Филиппова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 12. – С. 13-16.
7. Вакулин А. А. Проблемы измерения расхода и количества многофазных потоков / А. А. Вакулин, Гильманов, Е. В. Голубев, В. В. Котлов, С. Г. Никулин // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 5. – С. 96-99.
8. Вакулин А. А. Экспериментальный стенд для изучения течения многофазных потоков при различных температурах / А. А. Вакулин, Е. А. Хамов // Вестник ТюмГУ. – 2010. – № 6. – С. 75-79.
9. Валиуллин Р. А. Развитие многофазного термогидродинамического стенда с учетом решения практических задач геофизического кластера республики Башкортостан / Р. А. Валиуллин // [Электронный ресурс]. – 2016. – С. 1-4. Режим доступа: <http://novainfo.ru/article/7431>
10. Варгафтик Н. В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. В. Варгафтик // М.: Наука. – 1972. – 720 с.

11. Волынский И. А. Оптический расходомер многофазных потоков / И. А. Волынский, А. Г. Кокуев // Наука, образование, инновации: пути развития: материалы Четвертой всероссийской научно-практической конференции. КамчатГТУ. – Петропавловск-Камчатский. – 2013. – Ч. 1. – 243 с.

12. Генри М. Измерение расхода многофазного потока при добыче нефти и газа с использованием нового типа измерительной установки на базе кориолисового расходомера / М. Генри, А. А. Ефимов, Р. Казимири, А. Г. Лепихин, А. Н. Лищук, М. Томбс // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 3. – С. 36-38.

13. ГОСТ Р 54500.1-2011 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения. М.: Стандартиформ, 2012. – 24 с.

14. ГОСТ Р 54500.3-2011 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартиформ, 2012. – 107 с.

15.

16. ГОСТ 8.586.1 – 2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. – М.: Стандартиформ, 2007. – 72 с.

17. ГОСТ 8.586.2 – 2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования. – М.: Стандартиформ, 2007. – 59 с.

18. ГОСТ 8.586.3 – 2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования. – М.: Стандартиформ, 2007. – 46 с.

19. ГОСТ 8.586.4 – 2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 4. Трубы Вентури. Технические требования. – М.: Стандартиформ, 2007. – 35 с.

20. ГОСТ 8.586.5 – 2005 Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений. – М.: Стандартиформ, 2007. – 143 с.

21. ГОСТ Р 8.902.1-2015 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метод переменного перепада давления специальные сужающие

устройства. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования. – М.: Стандартиформ, 2016. – 16 с.

22. Гриценко А. И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах / А. И. Гриценко, О. В. Клапчук, Ю. А. Харченко // М.: Недра. – 1994. – 238 с.

23. Дмитриев А. В. Погрешность и неопределенность измерений / Б. Г. Артемьев, А. В. Дмитриев // М.: МИЭМ. – 2008. – 65 с.

24. Дробков В. П. Анализ доплеровских методов измерения частоты в ультразвуковых измерителях скорости и расхода двухфазных потоков / В. П. Дробков, С. А. Лабутин, В. А. Чернигин // Датчики и системы. – 2003. – № 12. – С. 17-20.

25. Захаров И. П. Неопределенность измерений для чайников и начальников / И. П. Захаров // Учебное пособие. – Харьков. – 2013. – 36 с.

26. Ильинский В. М. Измерение массовых расходов / В. М. Ильинский // М.: Энергия. – 1973. – 144 с.

27. Кисилев П. Г. Гидравлика. Основы механики жидкости / П. Г. Кисилев // М.: Энергия. – 1980. – 360 с.

28. Кокуев А. Г. Измерения расхода фаз многофазного газожидкостного потока / И. А. Волынский, А. Г. Кокуев // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2013. – № 8. – С. 22-25.

29. Кравченко В. Измерения расхода с помощью кориолисовых расходомеров в случае двухфазного потока. Применение кориолисовых расходомеров в свете выхода ГОСТ Р 8. 615-2005 / В. Кравченко, М. Риккен // Законодательная и прикладная метрология. – 2006. – № 4. – С. 37-44.

30. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник / П. П. Кремлевский // Книга 1. – СПб.: Политехника. – 2002. – 409 с.

31. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник / П. П. Кремлевский // Книга 2. – СПб.: Политехника. – 2004. – 412 с.

32. Ланчаков Г. А. Многопараметрический контроль многофазных потоков на устье скважин / Г. А. Ланчаков, М. А. Гавшин, Б. А. Григорьев // Научно-технический сборник вести газовой науки. – 2011. – № 2. – С. 39-51.

33. Мансуров А. А. Определение расхода компонентов многофазного потока на основе комбинации измерений / А. Г. Кокуев, А. А. Мансуров // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 31-37.

34. Михеев В. А. Бессепарационный многофазный расходомер как «подрывная» инновация в нефтегазовой отрасли и проблемы ее продвижения / В. А. Михеев, А. А. Вакулин, Е. М. Черкашов // Наука и бизнес: пути развития. – 2017. – № 3. – С. 5-13.

35. Наумчик И. В. Массовый расходомер жидкостей / И. В. Наумчик, И. Ю. Кинжагулов, А. П. Крень, К. А. Степанова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – № 5. – С. 900-906.

36. Наумчик И. В. Способ измерения расхода многофазной среды / И. В. Наумчик, С. Ю. Пирогов, А. В. Шевченко // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10. – С. 507-511.

37. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин // Часть 1. – М.: Наука. – 1987. – 464 с.

38. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нигматулин // Часть 2. – М.: Наука. – 1987. – 360 с.

39. Патрикеев В. Г. Современная нормативная база расходомеров переменного перепада давления с сужающими устройствами / В. Г. Патрикеев, Б. М. Беляев // М.: ВНИИМС. – 1998. – 38 с.

40. Руденко В. А. Проблема измерения расхода многофазных сред / В. А. Руденко // Законодательная и прикладная метрология. – 2014. – № 2. – С. 39-41.

41. Рымаренко К. В. Многофазная расходометрия: принципы работы и опыт применения на примере технологии Vx / К. В. Рымаренко // Недропользование XXI век. – 2011. – № 1. – С. 28-35.

42. Сергеев А. Г. Метрология / А. Г. Сергеев, В. В. Краюхин // Учебное пособие. – М.: Логос. – 2005. – 272 с.

43. Стариков В. П. Границы точности формирования перепада давлений в сужающих устройствах / В. П. Стариков, Н. А. Владимирова // Коммерческий учет энергоносителей: материалы 26-ой международной научно-практической конференции. – Спб. – Борей-Арт. – С. 299-305.

44. Тоски Э. Эволюция измерений многофазных потоков и их влияние на управление эксплуатацией / Э. Тоски, Э. Окугбайе, Б. Теувени, Б. В. Ханссен, Дж. Смит // Нефтегазовое обозрение. – 2003. – С. 68-77.

45. Тювени Б. Новая технология замера многофазного потока при испытаниях скважин / Б. Тювени, Э. Тоски, Н. Хопман, О. Кулятин // Нефтесервис. – 2006. – № 3. – С. 67-72.

46. Шабаров А. Б. Гидрогазодинамика / А. Б. Шабаров // Учебное пособие. – Тюмень. Издательство ТюмГУ. – 2011. – 404 с.

47. Шабаров А. Б. Физико-математическая модель и метод расчета течения газоконденсатной смеси в пласте / А. Б. Шабаров // Вестник ТюмГУ. – 2014. – № 7. – С. 7-18.

48. Ширковский А. И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений / А. И. Ширковский // М.: Недра. – 1987. – 347 с.

49. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений / И. Ф. Шишкин // Спб.: Питер. – 2010. – 192 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

КОД ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА МАССОВОГО РАСХОДА ГКС ЧЕРЕЗ
ШТУЦЕР

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <cstring>
#include <cmath>
#include <cstdlib>
#include <iomanip>
#include <string>
using namespace std;
double* init1XArray(int n);

string getString(string paramName, string file, int count) {
    ifstream strm;
    strm.open(file.c_str());
    string str;
    string c;
    while (strm >> str)
        if (str == paramName)
            break;
    for (int i = 0; i < count; i++)
        strm >> str;
    strm >> c;
    strm.close();
    return c;
}

double getNumber(string paramName, string file, int count)

{ return atof(getString(paramName, file, count).c_str());
}

int* getArrayDim(string paramName, string file) {
    int n = getNumber(paramName, file, 0);
    int* dim = new int[n + 1];
    dim[0] = n;
    for (int i = 1; i < n + 1; i++)
        dim[i] = getNumber(paramName, file, i);
    return dim;
}

double* getDoubleArray1(string paramName, string file, int* dim) {
    double* array = init1XArray(dim[1]);
```

```

ifstream strm;
strm.open(file.c_str());
string str;
string c;
while (strm >> str)
if (str == paramName)
break;
for (int i = 0; i < dim[0] + 1; i++)
strm >> str;
for (int i = 0; i < dim[1]; i++)
strm >> array[i];
return array;
}

int main(int narg, char **arg) {
string inputFile;
inputFile = arg[1];

double K = getNumber("K", inputFile, 0);

double* P2 = init1XArray(K);
double* P2sh = init1XArray(K);
double* T2 = init1XArray(K);
double* RO2 = init1XArray(K);
double Pshz;
double Psh;
double P2z;
double betakrg;
double Gkrg;
double fl;
double Gch;
double lyash;
double lya2;
double* Vsh = init1XArray(K);
double* V2 = init1XArray(K);
double* Tsh = init1XArray(K);
double* ROsh = init1XArray(K);
/*double* ROg1 = init1XArray(K);
double* ROI1 = init1XArray(K);
double* ROg2 = init1XArray(K);
double* ROI2 = init1XArray(K);*/
double c;
double* betakrgks = init1XArray(K);
double xch;
double y;
double x1;

```

```

double* Gkrkgs = init1XArray(K);
double pi;
double betag2;
double* Q2 = init1XArray(K);
double Qg2;
double Ql2;
double Gl2;
double Gg2;
double T2zam;
double T2rv;
double* P1 = init1XArray(K);
double* T1 = init1XArray(K);
double* G = init1XArray(K);
double* d1 = init1XArray(K);
double* d2 = init1XArray(K);
double* dsh = init1XArray(K);
double* RO1 = init1XArray(K);
double V1;
double S1;
double T1z;
double P1z;
double betag;
double phi;
double Qg1;
double Q1;
double Gg1;
double Gl1;
double akr;
double Beta;
double* Ggr = init1XArray(20);
//int p = 0;

double k = getNumber("k", inputFile, 0);

double Cl = getNumber("Cl", inputFile, 0);

double z = getNumber("z", inputFile, 0);

double M = getNumber("M", inputFile, 0);

double D = getNumber("D", inputFile, 0);

double ROl = getNumber("ROl", inputFile, 0); // Заменить на ROl1[i]

double ROg = getNumber("ROg", inputFile, 0); // // Заменить на ROg1[i]

double R = 8314 / M;

```

```

for (int i = 0; i < K; i++)
{
T1[i] = getNumber("T1", inputFile, i + 1);
P1[i] = getNumber("P1", inputFile, i + 1);
G[i] = getNumber("G", inputFile, i + 1);
d1[i] = getNumber("d1", inputFile, i + 1);
d2[i] = getNumber("d2", inputFile, i + 1);
dsh[i] = getNumber("dsh", inputFile, i + 1);
RO1[i] = getNumber("RO1", inputFile, i + 1);
S1 = M_PI * d1[i] * d1[i] / 4;
V1 = G[i] / (RO1[i] * S1);
double Cpg = k * R / (k - 1);
T1z = T1[i] + V1 * V1 / (2 * Cpg);
P1z = P1[i] * pow((T1z / T1[i]), (k / (k - 1)));
phi = (RO1 - RO1[i]) / (RO1 - ROg);
betag = phi;
Q1 = G[i] / RO1[i];
Qg1 = betag * Q1;
Gg1 = Qg1 * ROg;
G11 = G[i] - Gg1;
akr = sqrt(2 * k * R * T1z / (k + 1));

// 2'

Pshz = P1z
- (1 - dsh[i] * dsh[i] / d1[i] / d1[i]) * RO1[i] * V1 * V1 / 4;
double rk = 2 / (k + 1);
double cd = k / (k - 1);
betakrg = pow(rk, cd);
f1 = sqrt(2 * k / (k + 1)) * pow((k + 1) / 2, 1 / (k - 1));
Gkrg = f1 * Pshz * M_PI * dsh[i] * dsh[i] / (4 * sqrt(R * T1z));
if (G[i] > Gkrg)
G[i] = Gkrg;
Gch = G[i] / Gkrg;
c = 1 / ((1 - betakrg) * betakrg);
Psh = Pshz * (0.5 + sqrt(0.25 - Gch * Gch / c));
P2sh[i] = Psh;
betakrgs[i] = 0.4 + 10 * (betakrg - 0.4) * (betag - 0.9);
xch = (betag - 0.9) * 10;
if (xch <= 0.5)
y = 0.278 * xch;
else {
x1 = 2 * (xch - 0.5);
y = 0.139 - 0.283 * x1 + 1.144 * x1 * x1;
}
Gkrgks[i] = Gkrg * (0.706 * y + 0.294);

```

```

if (G[i] > Gkrkgs[i])
cout << "Pereschet parametrov v plaste, skvazhine, shtucere"
<< endl;
else {
pi = P2sh[i] / Pshz;
lyash = sqrt((k + 1) / (k - 1) * (1 - pow(pi, (k - 1) / k)));
Vsh[i] = lyash * akr;
Tsh[i] = T1z * (1 - (k - 1) / (k + 1) * lyash * lyash);
ROsh[i] = P2sh[i] / (R * Tsh[i] * z);
Vsh[i] = G[i] * 4 / (ROsh[i] * M_PI * dsh[i] * dsh[i]);
P2z = Pshz
- (d2[i] * d2[i] / dsh[i] / dsh[i] - 1)
* (d2[i] * d2[i] / dsh[i] / dsh[i] - 1) * ROsh[i]
* Vsh[i] * Vsh[i] / 2;
RO2[i] = ROg * P2z / 101300;
V2[i] = G[i] * 4 / (RO2[i] * M_PI * d2[i] * d2[i]);
lya2 = V2[i] / akr;
P2[i] = P2z * pow(1 - (k - 1) / (k + 1) * lya2 * lya2, k / (k - 1));
T2[i] = T1z * (1 - (k - 1) / (k + 1) * lya2 * lya2);

RO2[i] = P2[i] / R / z / T2[i];
V2[i] = G[i] * 4 / (RO2[i] * M_PI * d2[i] * d2[i]);
lya2 = V2[i] / akr;
P2[i] = P2z * pow(1 - (k - 1) / (k + 1) * lya2 * lya2, k / (k - 1));
T2[i] = T1z * (1 - (k - 1) / (k + 1) * lya2 * lya2);
betag2 = (RO1 - RO2[i]) / (RO1 - ROg); //// Qg2 = betag2 * Q2[i];
Ql2 = (1 - betag2) * Q2[i];
Gg2 = Qg2 * ROg;
Gl2 = G[i] - Gg2;
T2rv = (Cpg * Gg1 + Cl * Gl1) / (Cpg * Gg2 + Cl * Gl2) * T1[i]
- D / (Cpg * Gg2 + Cl * Gl2) * (P1[i] * Gg1 - P2[i] * Gg2)
+ 1.1 * (V1 * V1 - V2[i] * V2[i]) * G[i]
/ (2 * (Cpg * Gg2 + Cl * Gl2));
T2zam = T1[i] - D * Gg1 * (P1[i] - P2[i]) / (Cpg * Gg1 + Cl * Gl1)
+ 1.1 * (V1 * V1 - V2[i] * V2[i]) * G[i]
/ (2 * (Cpg * Gg1 + Cl * Gl1));
T2[i] = 0.5 * T2zam + 0.5 * T2rv;
}

Beta = 0;
// cout << "Vvedite nomer skvaginy (0 or 1)" << endl;
// cin >> p;
for(int l = 0; l < 20; l++)
{
Ggr[l] = Gkrkgs[0]*sqrt((1-Beta)*Beta/(0.5*(1-betakrgks[0]]));

```

```

Beta += 0.05;
if (Beta < betakrgks[0])
{
Ggr[1] = Gkrgks[0];
}
}

string outFile = "sh.txt";
ofstream outStrm;
outStrm.open(outFile.c_str());

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "P2sh" << '\n';
outStrm << P2sh[i] << fixed << setprecision(6) << setw(3) << '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "Gkrgks" << '\t' << Gkrgks[i] << fixed << setprecision(1)
<< setw(3) << '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int l = 0; l < 20; l++) {
outStrm << "Ggr" << '\t' << Ggr[l] << fixed
<< setprecision(2) << setw(3) << '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "betakrgks" << '\t' << betakrgks[i] << fixed
<< setprecision(2) << setw(3) << '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "Vsh" << '\n';
outStrm << '\t' << Vsh[i] << fixed << setprecision(2) << setw(3)
<< '\t';
outStrm << '\n';
}

```

```

}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "Tsh" << '\n';
outStrm << '\t' << Tsh[i] << fixed << setprecision(3) << setw(3)
<< '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "P2" << '\n';
outStrm << '\t' << P2[i] << fixed << setprecision(2) << setw(3)
<< '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "V2" << '\n';
outStrm << '\t' << V2[i] << fixed << setprecision(2) << setw(3)
<< '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "T2" << '\n';
outStrm << '\t' << T2[i] << fixed << setprecision(3) << setw(3)
<< '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

for (int i = 0; i < K; i++) {
outStrm << "RO2" << '\n';
outStrm << '\t' << RO2[i] << fixed << setprecision(3) << setw(3)
<< '\t';
outStrm << '\n';
}
outStrm << '\n';

return 0; }double* init1XArray(int n) {
double* a = new double[n]; return a;
}

```