

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
СУМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

АЛЬ РАММАХИ Мустафа Макки Мохаммедали

УДК 66.074.1:547.912

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЕРЦИОННО-
ФИЛЬТРУЮЩИХ СЕПАРАТОРОВ**

Специальность 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Склабинский Всеволод Иванович

СУМЫ– 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ.....	6
ВВЕДЕНИЕ	13
РАЗДЕЛ 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ	20
1.1. Основные направления интенсификации процессов разделения капель жидкости и газа.....	20
1.2. Конструкции инерционных сепараторов, фильтров и их характеристики.....	25
1.3. Гидродинамические факторы, влияющие на интенсивность сепарации.....	35
1.4. Движение газа и жидкости в инерционных сепараторах...	38
1.5. Основные гидравлические характеристики сепарационного оборудования.....	43
1.6. Движение капель жидкости в фильтрующих элементах и гидравлические характеристики таких элементов.....	46
1.7. Основные преимущества инерционно-фильтрующих сепараторов.....	47
1.8. Основные направления теоретического и экспериментального исследования сепарационных характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов.....	50
Выводы к разделу 1	51
РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ИНЕРЦИОННО-ФИЛЬТРУЮЩИХ СЕПАРАТОРОВ	52

2.1.Разработка физической модели движения газокапельных потоков в рабочей полости инерционно-фильтрующих сепараторов.....	52
2.1.1.Формирование потока капель.....	57
2.1.2. Формирование поля скоростей газового потока в криволинейном канале инерционно-фильтрующего сепаратора.....	62
2.1.3. Роль и эффективность работы сепарационных элементов в рабочей полости инерционно-фильтрующих сепараторов	72
2.1.4. Влияние отводов жидкости на эффективность работы инерционно-фильтрующего сепаратора	73
2.2.Влияние свойств газокапельной среды на эффективность сепаратора.....	84
2.3. Влияние конструктивных особенностей инерционно-фильтрующего сепаратора на движение потоков и его сепарационные характеристики.....	86
2.4.Математическое описание влияния гидродинамики газокапельного потока в рабочей полости инерционно-фильтрующего сепаратора на эффективность его работы.....	90
Выводы к разделу 2.....	105
РАЗДЕЛ 3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	106
3.1. Описание экспериментальных установок.....	106
3.2.Исследуемые гидродинамические характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов.....	111
3.3.Методы замера экспериментальных значений основных характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов.....	113

3.4. Определение ошибок экспериментальных исследований характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов.....	120
3.5. Компьютерное моделирование течения газа в канале инерционно-фильтрующего элемента.....	123
Выводы к разделу 3.....	132
РАЗДЕЛ 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	133
4.1. Основные сепарационные характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов.....	133
4.1.1. Гидродинамические режимы работы инерционно-фильтрующих сепараторов и их влияние на эффективность процесса сепарации.....	133
4.1.2. Сравнение характеристик различных сепарационных устройств.....	136
4.2. Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований.....	137
4.3. Сравнение результатов экспериментальных измерений с результатами теоретических расчетов.....	153
Выводы к разделу 4.....	156
РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЕРЦИОННО-ФИЛЬТРУЮЩИХ СЕПАРАТОРОВ.....	157
5.1. Методика расчета инерционно-фильтрующего жалюзийного блока газосепаратора.....	157
5.2. Проведение производственных испытаний опытно-промышленных образцов инерционно-фильтрующих сепараторов.....	165

5.3.Выводы и рекомендации по проектированию инерционно- фильтрующих сепараторов тонкой очистки газа.....	168
Выводы к разделу 5.....	170
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	171
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	173
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	189

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

- $d_э$ - эффективный (эквивалентный) гидравлический диаметр, м;
- η - эффективность очищения газов (коэффициент сепарации, степень очистки), %;
- η_f - фракционная эффективность очистки, % ;
- a - удельная поверхность фильтровального материала, м²/м³;
- h - толщина фильтровального слоя, м;
- h - толщина пленки истекающей жидкости, м;
- $p_{ст}$ - статическое давление, Па;
- R_c - средний радиус капель, м;
- c_f - содержание частиц данной фракции в аэродисперсной системе, % (капли);
- w - скорость капель относительно газового потока, м/с;
- F_m - сила тяжести, Н;
- F_a - сила аэродинамического сопротивления в газовом потоке, Н;
- b - расстояние от центральной линии набегающего потока до критической траектории, м;
- L_e - расстояние между волокнами фильтрующего элемента, м;
- R_u - радиус криволинейного участка сепарационного канала (жалюзи), м;
- R - радиус капли, м;
- m - пористость фильтровального материала, м³/м³;
- s - полный шаг расположения гофр жалюзи, м;
- p - полное давление в рассматриваемой точке потока, Па;

- σ - поверхностное натяжение капель жидкости, Н/м;
- ρ - плотность среды, кг/м³;
- $\rho_{ч}$ - плотность дисперсных капель, кг/м³;
- $\rho_{г}$ - плотность газового потока, кг/м³;
- $n(R)$ - плотность вероятности случайной величины R;
- C_w - объемное содержание жидкой фазы, м³/м³;
- $V_{ч}$ - объем капли, м³;
- G - нагрузка установки по газовому потоку, кг/с;
- M - молекулярная масса газа, кг/кмоль;
- R_m - минимальный радиус капель, м;
- m - масса частицы, кг;
- $h_{кр}$ - критическая толщина пленки, м;
- St - критерий Стокса;
- Re - критерий Рейнольдса;
- Ar - критерий Архимеда;
- η - коэффициент эффективности;
- D - коэффициент диффузии капель, м²/с;
- $\mu_{г}$ - коэффициент динамической вязкости газового потока, Пас;
- N - количество капель в единице объема, м⁻³;
- t - длительность, с;
- L - длина прямолинейного участка сепарационного канала (жалюзи), м;
- $L_{ц}$ - длина криволинейного участка сепарационного канала (жалюзи), м;
- $p_{дин}$ - динамическое давление (скоростной напор), Па;
- d_k - диаметр капель жидкости, м;
- $d_{в}$ - диаметр волокон, м;

- d_1 - диаметр волокон фильтрующего элемента, м;
 ΔP - гидравлическое сопротивление, Па;
 H - высота сепарационного канала (жалюзи), м;
 t - время, с;
 T_c - время пребывания капли в сепараторе, с;
 T - абсолютная температура, К;
 u - абсолютная скорость капель, м/с;
 v - абсолютная скорость газового потока, м/с;
 $V_r(r)$, - составляющая скорости газового потока, м/с;
 $V_f(r)$ - составляющая скорости газового потока, м/с;
 $W_r(r)$ - составляющие скорости капельного потока, м/с;
 $W_f(r)$ - составляющие скорости капельного потока, м/с;
 $_C1$ - константа интегрирования;
 $_C2$ - константа интегрирования;
 $_C3$ - константа интегрирования;
 F_c - сила аэродинамического сопротивления капли, Н;
 $F_{ц}$ - центробежная сила, Н;
 ξ - коэффициент сопротивления;
 M - момент количества движения;
 C_w - содержание влаги в газе, м³/м³;
 L - длина жалюзийной насадки, м;
 F_a - коэффициент живого сечения насадки;
 m - гидравлический радиус жалюзийной насадки, м;
 ω - скорость набегания газа в лобовое сечение жалюзийной насадки, м/с;
 ρ - плотность газа при рабочих условиях, кг/м³;
 ξ - коэффициент сопротивления жалюзийной насадки;

R_c	-	средний радиус капли, м;
σ_1	-	среднеквадратичное отклонение;
n	-	комплекс;
n_R	-	логнормальное распределение капель на входе в сепаратор;
C	-	распределение частиц по радиусу канала;
r_s	-	средний радиус гофры;
μ_g	-	вязкость жидкости;
V_t	-	скорость газа на входе в аппарат, м/с;
r_1, r_2	-	радиусы канала;
n_{Ri}	-	плотность распределения капель в любой точке гофры;
n_{R1}	-	плотность распределения капель в 1-й гофре;
n_{R2}	-	плотность распределения капель в 2-й гофре;
n_{R3}	-	плотность распределения капель в 3-й гофре;
n_{R4}	-	плотность распределения капель в 4-й гофре;
ϕ_1	-	угол, на котором ведется расчет;
τ_1	-	время релаксации капли;
r, d, R	-	диаметр капли;
r_8	-	радиус гофры;
e_f	-	эффективность работы гофры, %;
V_o	-	производительность по газу при н.у., $\text{м}^3/\text{ч}$;
P	-	давление газа в аппарате, Па;
T	-	температура газа, К;
C_o	-	концентрация жидкой фазы в газе, $\text{кг}/\text{м}^3$;
L_o	-	массовый расход жидкости на входе, $\text{кг}/\text{с}$;
ρ_o	-	плотность газовой смеси при н.у., $\text{кг}/\text{м}^3$;
ρ_ψ	-	плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

M	-	молекулярная масса газа;
Z	-	коэффициент сжимаемости газа;
τ	-	приведенная температура, К;
π	-	приведенное давление, Па;
$T_{n.kp}$	-	псевдокритические параметры, К, Па;
$P_{n.kp}$	-	
T_{kp}, P_{kp}	-	критические параметры, К, Па;
d	-	диаметр капли, м;
d_{min}	-	минимальный диаметр капли, м;
$n, \Delta d$	-	количество фракций и диапазон изменения между фракциями, м;
m_d, σ_d	-	математическое ожидание, дисперсия распределения капель и
σ_1^2	-	среднеквадратичное отклонение;
$L_{общ}$	-	длина общая жалюзи, м;
$L_{прям}$	-	длина общего прямого участка, м;
t, δ	-	ширина жалюзи и дренажного канала, м;
n_k, n	-	число сепарационных каналов, шт.;
R_1	-	радиус гофры, м;
A	-	шаг гофр жалюзей, м;
C	-	перекрытие гофр жалюзей, м;
φ	-	угол раскрытия гофры, рад;
D	-	диаметр сепаратора, м;
H	-	высота жалюзийного пакета, м;
S	-	площадь проходного сечения сепаратора, м ² ;
$[V_r]$	-	допустимая скорость газа, м/с;
s	-	траектория движения;

$V_z, V_f,$	
V_r	- составляющие скорости газа, м/с;
$W_k, W_\varphi,$	
W_r	- составляющие скорости капли, м/с;
m_k	- масса дисперсной капли, кг;
ω^2	- угловая скорость капли, 1/с;
r	- радиус траектории капли, м;
j	- количество гофр, шт.;
$d_э$	- эквивалентный диаметр канала, м;
Π	- смачиваемый периметр, м;
V_e	- объем жидкости в элементарном участке, м ³ ;
m	- пористость фильтра, м ³ /м ³ ;
h	- общая высота фильтра до лотка, м;
$h_{эл}$	- высота элементарного участка, м;
$n_{эл}$	- количество элементарных участков, шт.;
$S_{жс}$	- поверхность площади входа жалюзийного пакета, м ² ;
S_c	- поверхность площади свободного сечения аппарата, м ² ;
r_{min}	- минимальный радиус капель, м;
g	- ускорение свободного падения, м/с ² ;
K_1	- доля жидкости, улавливаемая в первой гофре;
$V_{жс,ул}$	- количество уловленной жидкости в одном элементарном объеме в первой гофре, м ³ /с;
V_ϕ	- объем элементарного объема фильтра, м ³ ;
S_ϕ	- площадь поперечного сечения фильтра, м ² ;
Sr	- перемещение капли по оси r , м;

- Sphi - перемещение капли по оси φ , м;
dphi - шаг расчета траектории полета капли по оси φ , рад;
dtau - шаг расчета по времени, с.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием качественной подготовки природного и нефтяного газа для дальнейшей транспортировки и использования на промышленных предприятиях является очищение от жидкой фазы и твердых частиц. Жидкая фаза, состоящая из воды и высокомолекулярных углеводородов(конденсат), выносится вместе с газом из буровых скважин или выделяется во время транспортировки по трубопроводам при снижении температуры. Наличие капельной жидкости в газе приводит к снижению производительности и коэффициента использования магистральных трубопроводов в среднем на 20–25% в результате снижения гидравлического сопротивления [1].

Применяемое в технологических линиях газоперерабатывающих производств традиционное газосепарационное оборудование отличается низкой степенью разделения и высоким гидравлическим сопротивлением[2].

Эти исследования направлены на разработку высокоэффективного инерционно-фильтрующего аппаратного оформления для интенсификации процесса газосепарации. Определение наиболее благоприятных режимов работы и конструктивных особенностей инерционно-фильтрующих газосепарационных элементов, комплексное теоретическое и экспериментальное изучение гидродинамики и структуры газожидкостных потоков в канале элемента и создание инженерной методики расчетов являются актуальными, потому что решают одну из важных проблем нефтегазовой промышленности Украины и мира на современном этапе.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа отвечает тематическому плану научно-исследовательских работ, запланированных на кафедре «Процессы и оборудование химических и нефтеперерабатывающих производств» (ПОХНП) Сумского государственного университета в рамках государственной тематики «Исследование гидродинамических и массотеплообменных характеристик

устройств с вихревыми и высокотурбулизированными одно- и двухфазными потоками» (номер государственной регистрации 0110U002632).

Результаты работы были использованы при расчете газосепарационного оборудования Центром исследования и развития нефтяной промышленности (PRDC) (Ирак, г. Багдад).

Результаты работы внедрены в виде методики расчетагазосепараторов на Пилиповском месторождении (ООО «Западтехногаз») переданные для изготовления на ООО «ТехНефтеГазСервис».

Цель и задачи исследования.Целью диссертационной работы является определение гидродинамических характеристикинерционно-фильтрующего сепаратора и влияние конструктивных и технологических факторов на интенсивность и эффективность протекания процессов разделения в нем.

- Для достижения цели диссертационной работынеобходимо решить следующие задачи:
- провести анализ известных способов интенсификации процессов сепарации капель из газодисперсных потоков, основных направлений развития инерционно-фильтрующей техники и технологий газоочистки, выявить основные гидродинамические факторы и гидравлические характеристики, влияющие на интенсивность и эффективность процессов разделения в инерционно-фильтрующих сепараторах;
- разработать физическую модель движения газокапельных потоков в жалюзийных блоках инерционно-фильтрующих сепараторов и провести дальнейшее математическое моделирование гидродинамики в криволинейном инерционном сепарационном канале с фильтрующими элементами, что является основой для теоретических расчетов скорости и траектории движения газожидкостного потока и капель жидкости, гидравлического сопротивления и эффективности сепарации;
- экспериментально исследовать работу инерционно-фильтрующих сепараторов в различных гидродинамических режимах, оценить их влияние

на эффективность процесса сепарации, определить основные сепарационные характеристики;

- разработать инженерную методику гидродинамического расчета сепарационных характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов с определением оптимальных конструктивных и геометрических параметров инерционно-фильтрующих сепарационных элементов;
- провести апробацию и промышленное внедрение полученных научных результатов и практических рекомендаций к проектированию инерционно-фильтрующих сепараторов.

Объект исследования— процессы инерционно-фильтрующей сепарации капель жидкости из газожидкостного потока.

Предмет исследования— гидродинамические факторы, влияющие на процессы формирования, распределения, улавливания капель и отвода пленки жидкости из инерционно-фильтрующих сепараторов.

Методы исследования. В работе применялись методы планирования многофакторного эксперимента, численные методы газодинамики многофазных сред.

Для расчета гидродинамики движения газочапельных потоков применялся метод численного решения уравнений двухфазной гидродинамики в сепарационных каналах инерционно-фильтрующих газосепаратора.

Научная новизна полученных результатов:

- на основании теоретического анализа разработанной математической модели впервые получено аналитическое решение уравнений движения и неразрывности потока относительно составляющих локальных скоростей газового потока для частного случая плоского неосесимметричного течения в криволинейном канале, ограниченного стенками синусоидального профиля;

- расширено представление об основных методах и механизмах инерционно-фильтрующей сепарации, на основании предложенной физической модели движения газодисперсных потоков в каналах инерционно-фильтрующей сепарации впервые получено численное решение уравнений движения газодисперсной среды, что позволяет определить траектории движения капель и осуществить геометрическое профилирование криволинейных каналов с фильтрующими элементами;
- получила дальнейшее развитие континуальная модель криволинейного течения газодисперсного потока, что позволяет расчетным методом определить способ распределения капель по размерам и соответственно оценить эффективность сепарации после каждого последовательного криволинейного участка сепарационного канала;
- по результатам экспериментальных исследований модельных образцов криволинейных сепарационных каналов и их обобщения определены основные гидродинамические характеристики сепарационных элементов инерционно-фильтрующей сепарации.

Практическое значение полученных результатов:

- разработана инженерная методика расчета инерционно-фильтрующей сепарации, позволяющая определить основные геометрические размеры узлов и оценить фракционную и суммарную эффективность;

- предложены новый способ очистки природного и попутного газов от углеводородного конденсата и воды, а также новая конструкция инерционно-фильтрующей сепарации, защищенных международным патентом и сертификатом соответствия;

- на основании полученных научных результатов представляется возможным рассчитывать гидродинамические характеристики и конструировать высокоэффективные инерционно-фильтрующие сепараторы, что подтверждено внедрением в рамках работ, выполненных на Пилиповском месторождении (г. Ивано-Франковск, оборудование фирмы ООО «ТехНефтеГазСервис») согласно

государственной программе Министерства нефти и газа Республики Ирак (PRDC)(приложенияА,Б).

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя состоит в проведении физического и математического моделирования процессов, проходящих при формировании газового потока заданной структуры с непрерывно изменяющимся направлением вектора скорости, в подборе и апробации методик экспериментальных исследований сепарационных и гидродинамических характеристик газового и капельного потоков в рабочей области каждого из жалюзийных элементов инерционно-фильтрующего сепаратора, разработке экспериментального оборудования, обобщении полученных результатов. Постановка задачи и формирование выводов проводились под руководством научного руководителя д-ра техн. наук, профессора В. И.Склабинского. Соискатель принимал участие на всех стадиях научно-исследовательских работ. О результатах, представляющих основное содержание диссертационной работы, соискателем докладывалось на научно-технических и научно-практических конференциях [124-135]. Основной вклад соискателя, изложенный в статьях, написанных в соавторстве и опубликованных в профессиональных издательствах, утвержденных ДАК Украины, статьи в международных журналах, [56,117-119,121 ,137], и патент в Ираке [138], состоит в следующем:

- проведен обзор основных методов сепарации и доказаны преимущества использования инерционно-фильтрующих сепараторов в нефтегазовой промышленности, разработана физическая модель движения газочастиц в криволинейных каналах [56];
- сформулированы основные подходы расчета скорости газа в криволинейных каналах инерционно-фильтрующих сепараторов [117];
- на основании проведенных исследований получен общий вид математической модели расчета скорости газа и приведены результаты

экспериментальных исследований [118];

- рассмотрено движение газокапельных потоков в инерционно-фильтрующих сепараторах и разработаны основы для создания физической и математической модели их расчета [119];

- проведен обзор возможных сфер применения инерционно-фильтрующих сепараторов и даны рекомендации по применению данного типа оборудования в пищевой промышленности [121];

- разработана физическая и математическая модель формирования и движения газодисперсных, высокотурбулизированных потоков в криволинейных сепарационных каналах инерционно-фильтрующих сепараторов [137];

- рассмотрены основные принципы проектирования инерционно-фильтрующих сепараторов и даны рекомендации по осуществлению нового способа газосепарации и изготовлению устройства [138].

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов инженерного факультета Сумского государственного университета, секция «Химическая технология и инженерия» (2011 г.);
- VII Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» (г. Варна, Болгария, 2011 г.);
- Международной научно-практической конференции и выставке «Нефтегазовая энергетика-2011» (г. Ивано-Франковск, Украина);
- I Всеукраинской научно-технической конференции «Химическая технология: наука и производство» (г. Шостка, Украина, 2012 г.);
- Всеукраинской научно-технической конференции «Инновационный потенциал украинской науки XXI столетия» (2011 г.);

- Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса» (г. Полтава, 2012 г.);
- Всеукраинской научно-технической конференции «Химическая технология и инженерия» (СумГУ, 2012 г.);
- Международной научно-технической конференции «Технология-2012» (г. Северодонецк, 2012 г.);
- Третьей международной научно-практической конференции «Компьютерное моделирование в химии и технологиях их устойчивое развитие» (г. Рубежное, 2012 г.);
- Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований» (г. Одесса, том 7, С.70-75, 2013 г.);
- Второй международной научно-технической конференции «Вычислительный интеллект – 2013» (результаты, проблемы, перспективы) ComInt-2013 (г. Черкассы, Украина, 2013 г.);
- IX Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» (г. Варна, Болгария, 2013 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 23 научных работах, из них 10 статей – в научных журналах, (6 из них – в научных профессиональных изданиях, утвержденных ДАК Украины, 2 статьи в международных журналах), 12 – публикации тезисов докладов в материалах и трудах конференций, и 1 патент в Ираке.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованных источников, на 16 страницах, включающих 138 наименований, приложений. Общий объем диссертации - 208 страниц, из них 172 страницы основного текста, 9 таблиц, 8 иллюстраций, и приложения на 19 страницах.

РАЗДЕЛ 1

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Основные направления интенсификации процессов разделения капель жидкости и газа

Интенсификация процессов разделения неоднородных систем является в настоящее время актуальной задачей, решение которой позволит сократить энергетические затраты на его проведение, улучшить качество получаемых целевых продуктов, снизить себестоимость изготовления сепарационного оборудования, извлечь дополнительно ряд ценных продуктов, таких как, например, углеводородное сырье, и решить ряд других задач.

Разделение неоднородных сред, выбор методов разделения зависят от физических свойств разделяемых потоков и их фазового состояния. Это могут быть среды, представляющие собой системы газ – твердые тела, жидкость – взвешенные твердые частицы, газ – жидкость (в виде движущихся с потоком газа капель жидкости). В настоящей работе рассматривается последняя система, состоящая из движущегося потока газа, содержащего капли жидкости. Особенно актуальным является процесс разделения таких систем, в которых капли жидкости имеют микронные размеры, и скорости газового и капельного жидкостного потоков практически равны.

Для интенсификации процессов разделения капель жидкости и газа необходимо рассмотреть основные подходы к их разделению, которые заключаются в использовании различия в физических свойствах этих потоков: отличия в плотностях газа и жидкости, использование массовых сил гравитации, силы инерции. Важны размеры капель жидкости и ее свойства смачивать соприкасающиеся с ней поверхности. В зависимости от этого сепараторы,

используемые в промышленности (рисунок 1.1), можно разделить на гравитационные, инерционные и фильтрующие [3].

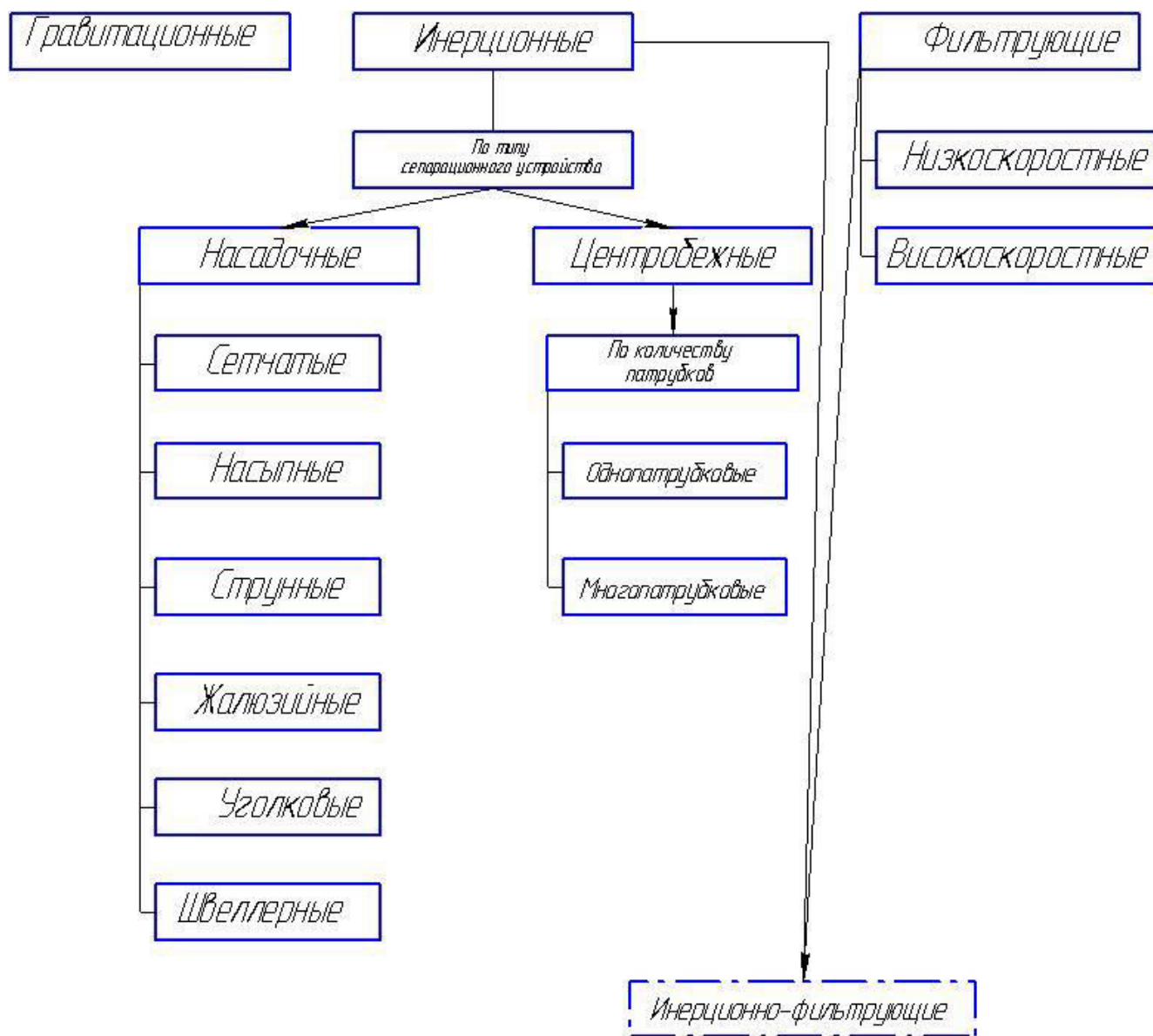


Рисунок 1.1 – Классификация аппаратов разделения газожидкостных систем

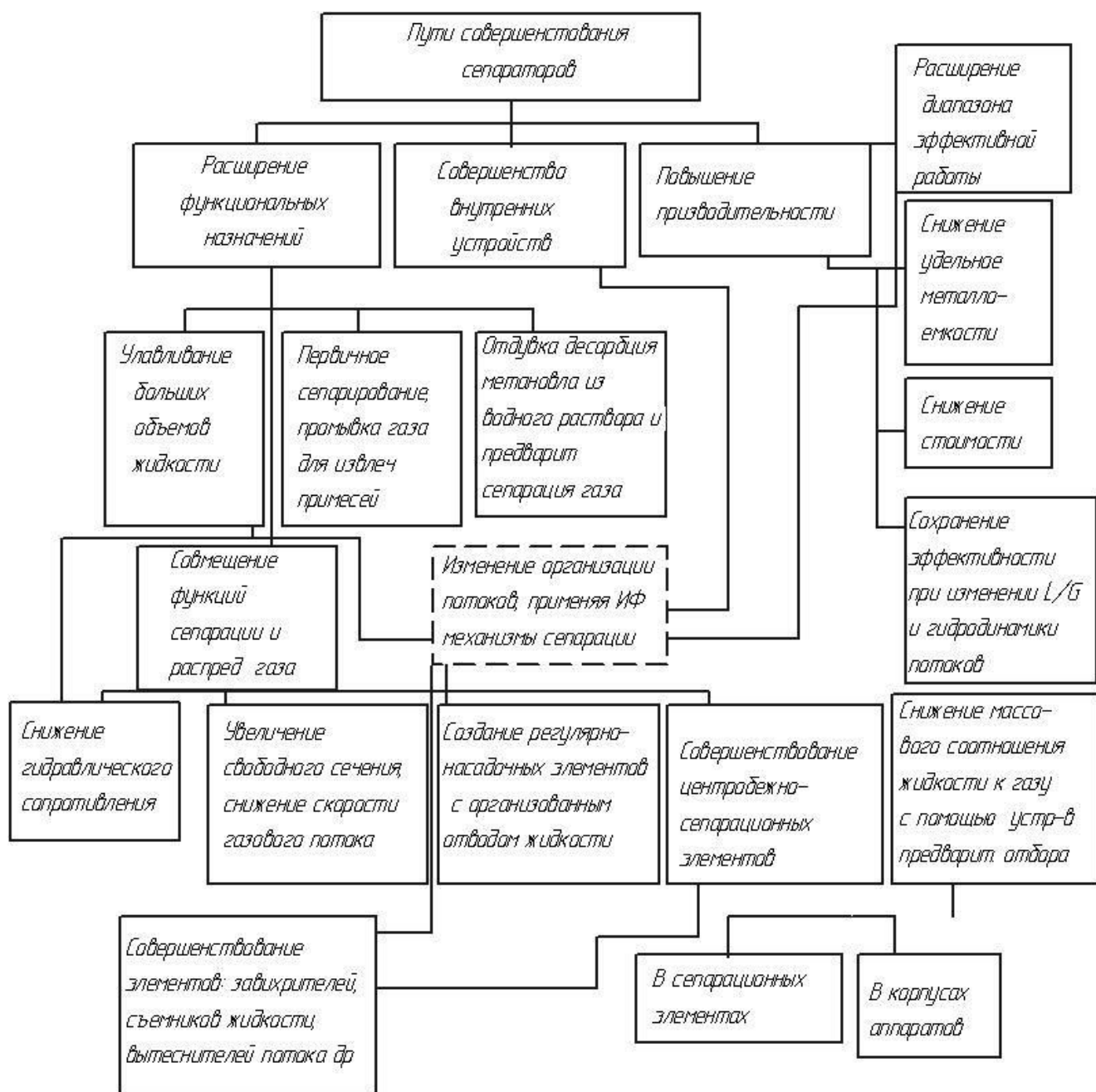


Рисунок 1.2 – Пути совершенствования сепараторов[4]

Каждый из этих способов разделения подразумевает широкий спектр оборудования. Для выявления достоинств и недостатков имеющихся способов разделения рассмотрим каждый из методов более подробно, а также пути совершенствования каждого, которые показаны на (рисунок 1.2)

Гравитационные и инерционные способы очистки газа основаны на

осаждении влаги под действием силы тяжести (гравитации), инерционной или центробежной силы [4]. Отделение газа от капель жидкости путем фильтрации основано на прохождении газа через пористые или волокнистые перегородки (фильтры).

Принцип действия гравитационного сепаратора основан на том, что газовый или воздушный поток попадает в расширяющуюся осаждающую камеру (емкость) гравитационного пылеуловителя, в которой замедляется скорость потока газа. Наблюдаем уменьшение величины аэродинамической силы, уносящей капли жидкости, и осаждение дисперсной влаги под действием силы тяжести (Рисунок 1.3).

Конструкция: конструктивно осаждающие камеры гравитационных аппаратов могут быть прямоточного, лабиринтного и полочного типов.

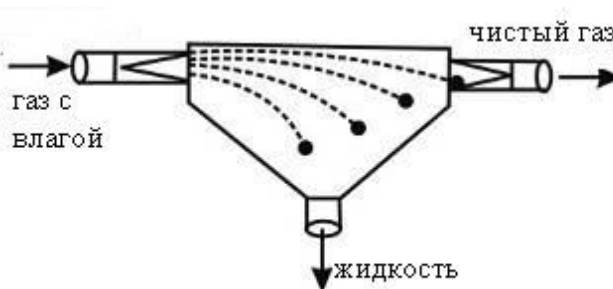


Рисунок 1.3. – Принципиальная схема гравитационного сепаратора [5]

Гравитационный способ очистки газа позволяет улавливать крупные взвеси с эффективностью 40–50%, причем удовлетворительно осаждаются частицы более чем 40–50 мкм [4]. Данные аппараты часто применяются в качестве первой ступени очистки и в основном для систем газ – твердые частицы.

Основными недостатками гравитационных сепараторов являются их относительно небольшая пропускная способность (малая производительность) и большие габариты.

С целью интенсификации процессов сепарации в таких аппаратах

применяют установку различных инерционных насадок, а также способы уменьшения скорости движения газожидкостного потока [6].

Инерционный способ очистки газа основан на инерционном осаждении влаги или взвешенных частиц под действием массовых сил инерции, возникающих при изменении направления движения газокapельного потока [7]. Газовый или воздушный поток попадает в аппарат, где геометрия проточной части имеет гофрированную форму. При изменении направления движения потока проточной части на капли начинают действовать массовые силы инерции. Под их действием происходит осаждение капель на стенках либо насадках. После осаждения уловленная влага отводится, а газовый поток выходит через определенное устройство, не смешиваясь с уловленной жидкостью.

Недостатками инерционного метода разделения могут быть вторичный унос жидкости, а также недостаточная сила инерции капель при снижении нагрузки по газу. Инерционный способ очистки газа позволяет улавливать частицы размером от 15–20 мкм с эффективностью 60–90% [7]. Для интенсификации процесса инерционного разделения используют увеличение инерционных сил и ускорение отвода уловленной жидкости из рабочей зоны аппарата.

Фильтрационный метод очистки основан на разделении газожидкостной смеси при прохождении через фильтрующую перегородку. Частицы осаждаются за счет эффекта касания, налипания, а также броуновского движения и других, менее значимых, эффектов [8]. Влиятельным фактором является предварительная коагуляция частиц, что существенно улучшает степень разделения.

Недостатками фильтров являются их малая пропускная способность, высокое гидравлическое сопротивление. Достоинством – высокая степень разделения (до 99,99%). Основным направлением интенсификации процесса фильтрования является применение новых фильтрующих материалов, новых конструкций фильтров, а также новых методов организации потоков в теле фильтрующей перегородки [8].

1.2. Конструкции инерционных сепараторов, фильтров и их характеристики

Отделение механических примесей и капельной жидкости от газового потока под действием силы гравитационного притяжения – наиболее ранний и универсальный способ очистки [7]. Процесс осаждения под действием силы тяжести включает в себя отделение твердых частиц, имеющих плотность, превышающую в несколько раз, а иногда и на порядок, плотность газового потока, от которого происходит отделение капельной жидкости.

Закручивание потоков в инерционных сепараторах в значительной мере интенсифицирует процессы сепарации жидкой фазы в связи с возникновением центробежного ускорения [9–15]. Если в гравитационном сепараторе осаждение происходит под действием силы тяжести, то в криволинейных и закрученных потоках возникают массовые силы инерции в связи с образованием инерционного поля, возникающего вследствие центробежного ускорения, действующего на капли. Отделение тяжелой фазы в криволинейных и закрученных потоках обычно осуществляется в жалюзийных, инерционных и циклонных аппаратах [15–32].

В жалюзийных аппаратах гетерогенный поток движется по криволинейным каналам, в инерционных – разделение происходит после выхода двухфазного потока из разгонного устройства, а в циклонных, центробежных сепараторах поле центробежных сил возникает в результате движения потока по спирали. Механические примеси и капельная жидкость во всех перечисленных случаях осаждаются из газового потока на стенки аппарата (или элемента насадки) под действием инерционной или центробежной силы.

Жалюзийный сепаратор (рисунок 1.4) [3] представляет собой аппарат с жалюзийной насадкой, имеющей волнистую форму (синусоиды) или

зигзагообразную, если насадка выполнена в виде набора уголков.

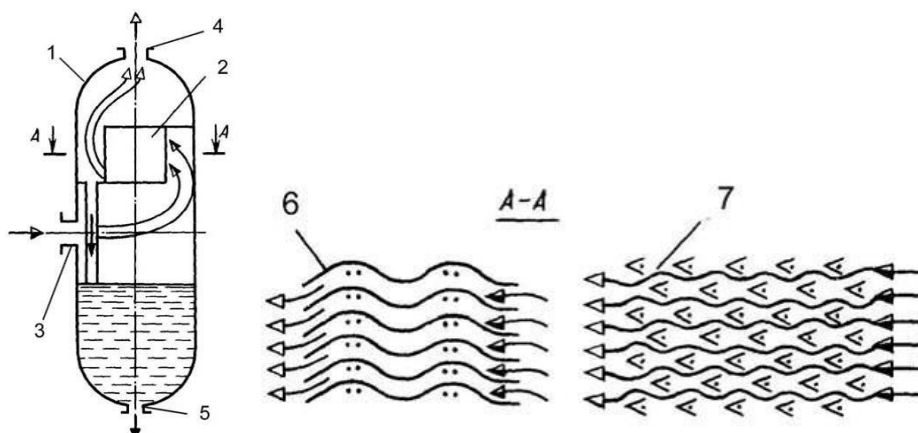


Рисунок 1.4 – Жалюзийный сепаратор

1 – корпус; 2 – пакет жалюзи; 3, – входной патрубков, 4 – выходной патрубков;
5 – дренажный патрубков; 6 – синусоидальные жалюзи; 7 – уголковые жалюзи

В отечественной практике наибольшее применение находят первые, взарубежной – вторые [5]. В волнистых жалюзи поток плавно изменяет направление, а частицы дисперсной фазы под действием инерционных сил оседают на вогнутых поверхностях и стекают по ним вниз аппарата. В уголковых жалюзи частицы попадают в створ уголка, как в ловушку, и тоже стекают вниз.

В настоящее время предлагается большое количество конструкций жалюзийных сепарационных элементов. К таким конструкциям можно отнести пылежидкостный отделитель [20], в котором продольные сепарационные элементы выполнены в виде W-образных пластин и уголков (рисунок 1.5). В этой же работе автором предлагается упрощенная конструкция проставки пылежидкостного отделителя, которая практически аналогична первой, однако обладает более простой конструкцией, упрощение которой не приводит к существенным изменениям характеристик отделителя.

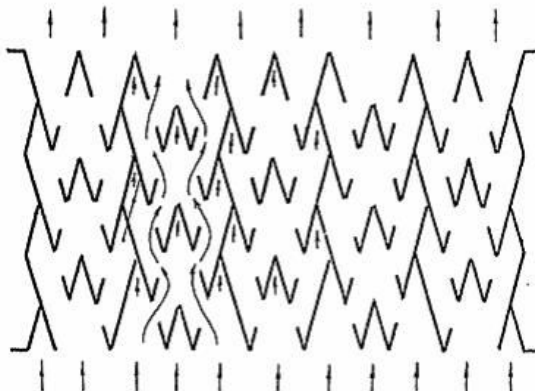


Рисунок 1.5 – Жалюзийная проставка пылежидкостного отделителя

Тем же автором предложены конструкции сепарационных элементов для очистки газа от капельной жидкости: газожидкостный сепаратор [20], в котором жалюзийная проставка и сепаратор капельной жидкости [24] собираются из отдельных W-образных пластин. Сепаратор капельной жидкости имеет более сложную конструкцию, но тоже собирается из отдельных фигурных частей. Продольные ряды зигзагообразных каналов образованы перегородками, которые составлены из элементов-уголков, между соседними кромками которых, а также на входе и выходе расположены U-образные ловушки.

Французская фирма «Крезолуар», которая являлась одним из основных поставщиков сепарационного оборудования для компрессорных станций Западной и Восточной Сибири, для удаления капельной жидкости из газового потока предлагает прямоточные сепараторы жалюзийного типа (рисунок 1.6)[6]. В корпусе прямоточного сепаратора устанавливается набор параллельных пластин специальной формы. Газ, проходя между пластинами, многократно изменяет направление движения. Капельная жидкость оседает на поверхности пластин и стекает в нижнюю часть аппарата. Для предотвращения уноса стекающей жидкости к выходному патрубку на выступающих частях пластин предусмотрены специальные желоба – ловушки.

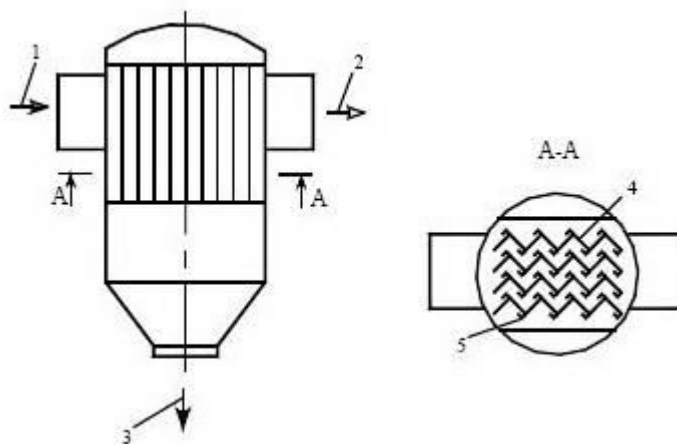


Рисунок 1.6 – Прямоточный сепаратор

1 – вход смеси; 2 – выход очищенного газа; 3 – слив отсепарированных примесей; 4 – изогнутая пластина; 5 – желоб-ловушка

Эффективность всех рассмотренных выше жалюзийных сепараторов напрямую связана с их аэродинамическим сопротивлением: чем больше желобов-ловушек, поворотов, уголков и т.д., тем эффективнее процесс сепарации и выше сопротивление аппарата.

В пластинчатом сепараторе [33], предназначенном для отделения капельжидкости, сепарационный элемент выполнен в виде параллельных между собой лопастей. Частицы жидкости осаждаются на лопастях, стекают по ним и собираются в нижней части аппарата. Данная конструкция проста в изготовлении и имеет малое аэродинамическое сопротивление потока, однако большие габаритные размеры, обусловленные необходимостью увеличения времени нахождения смеси в аппарате, делают применение данной конструкции в условиях компрессорных станций практически невозможным.

Вертикальный сепаратор, изображенный на рисунок 1.7[34], предназначен для отделения капель жидкости из газового потока. Завихрительные элементы выполнены в виде секторов цилиндрической поверхности с уменьшающейся осевой высотой в направлении движения потока.

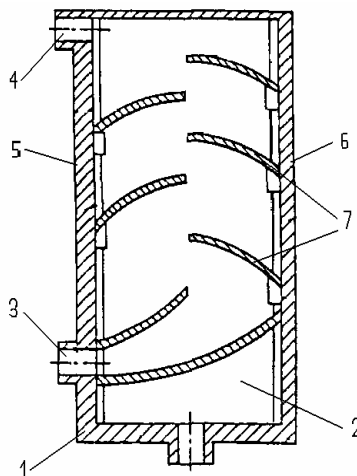


Рисунок 1.7 – Газожидкостный сепаратор:

1 – корпус; 2 – сборник жидкости; 3,4 – входной и выходной патрубки;
5,6 – вертикальные стенки; 7 – завихрительные элементы

Элементы закреплены на двух противоположных стенках вертикального корпуса. Ловушки жидкой фазы, размещенные на тех же стенках, в зонах динамического подпора защищены специальными щитками.

Авторы работы утверждают, что из-за уменьшения проходного сечения по газу по мере его подъема к выходному патрубку сепаратора повышается степень крутки при обтекании завихрительных элементов и, следовательно, улучшаются условия, способствующие выделению жидкой фазы из потока смеси. Габаритные размеры данного сепаратора напрямую зависят от скорости потока и резко возрастают при увеличении ее до 15 – 20 м/с.

Основным недостатком жалюзийных элементов является циклическая смена направления действия инерционной силы. Поток разворачивается на $45-120^{\circ}$ в одну сторону, затем – в обратную и т.д., что повышает аэродинамическое сопротивление аппаратов данного типа, в результате чего происходят снижение расхода и скоростей газа, а также понижение эффективности сепарации капель из потока газа.

Центробежные устройства, в которых неочищенный поток попадает в

аппарат с распределенной симметричной закруткой, относится к типу инерционных сепараторов. Инерционные сепараторы бывают с вертикальной подачей потока (смеси) сверху вниз или снизу вверх или с горизонтальной подачей (рисунок 1.8).

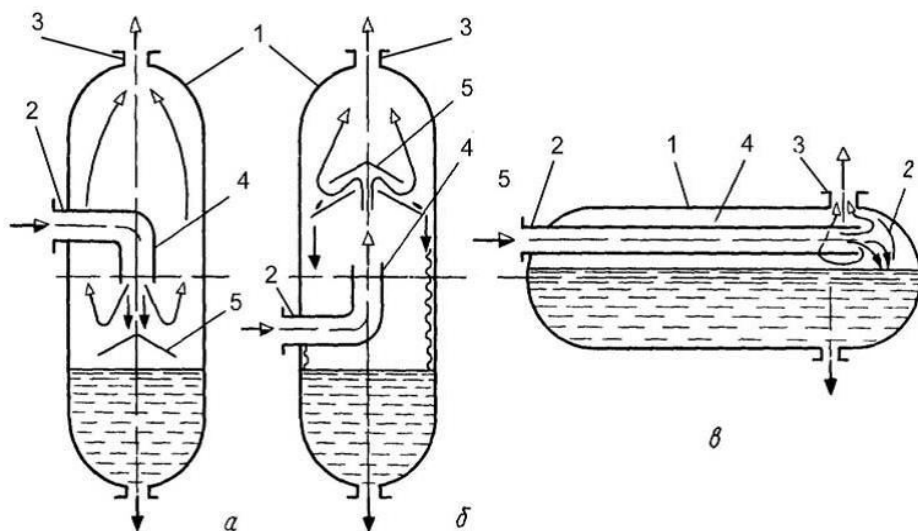


Рисунок 1.8 – Инерционные сепараторы:

а – вертикальный с подачей смеси вниз; б – вертикальный с подачей смеси вверх; в – горизонтальный; 1 – разгонное устройство; 2 – отражатель

Основными конструктивными элементами такого инерционного сепаратора являются завихритель (разгонное устройство) и отражатель. В разгонном устройстве поток приобретает достаточно большую скорость (достигает величины до 20 м/с) [7]. На отражатель выпадают под действием сил инерции частицы дисперсной фазы, а поток сплошной фазы меняет направление (до 180°) вокруг оси, перпендикулярной к направлению движения сплошной фазы.

Эффективность инерционных сепараторов находится на уровне гравитационных, но их габариты значительно меньше благодаря замене гравитационного осаждения со скоростью 0,05–0,2 м/с на инерционное со скоростью 5–20 м/с [35].

Одним из наиболее распространенных принципов выделения механических примесей и капельной жидкости из газового потока является их разделение в центробежном поле движущегося по спирали потока. Вихревое движение двухфазного потока в зоне сепарации реализовано в циклонных и центробежных прямоточных сепараторах [36](рисунок 1.9).

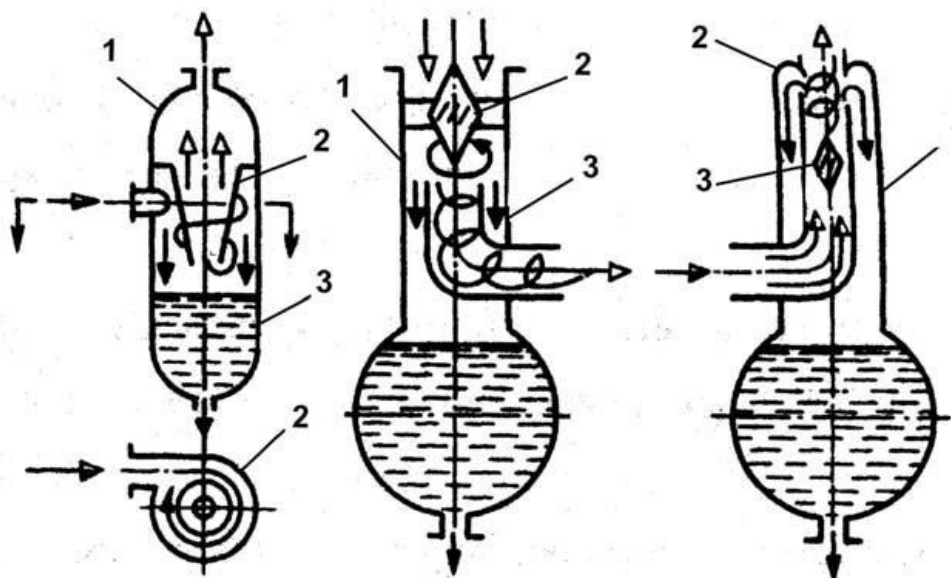


Рисунок 1.9 – Центробежные сепараторы

а – циклонный; б – с завихрителем с прямоточным отводом примесей;
в – с завихрителем с противоточным отводом примесей; 1 – корпус сепаратора; 2 – завихритель; 2 – узел отвода жидкости

В циклонном аппарате (Рисунок 1.9 а) смесь подается через тангенциальный патрубок, что обеспечивает вихревое движение в корпусе аппарата. Тяжелые частицы смеси оседают на стенках аппарата и стекают в нижнюю часть, а очищенный газ поднимается вверх и выводится из аппарата. В центробежных прямоточных сепараторах поток подается через завихритель сверху вниз (рисунок 1.9 б) или снизу вверх (рисунок 1.9 в). В первом случае тяжелые примеси, выделяющиеся из газа, отводятся по потоку в кольцевую щель, во втором – навстречу потоку, оседая на щелевом, дырчатом или другом узле отвода. В обоих

случаях сплошная фаза движется прямоточно в отличие от циклонных аппаратов, где она сначала по внешней спирали спускается вниз аппарата, а затем изменяет свое направление на противоположное, и, поднимаясь по внутренней спирали, через выходной патрубок выводится из аппарата.

Процесс центробежной сепарации – явление очень сложное и трудно поддающееся аналитическому описанию. В нем выделяют такие составляющие процесса [7]:

- первичное осаждение частиц, в частности, капельной жидкости в поле центробежных сил, и образование пленки или жгутов жидкости на стенке;
- срыв жидкости с волнистой поверхности пленки, текущей по стенкам аппарата;
- разбрызгивание пленки жидкости осаждающимися каплями;
- турбулентная диффузия первично неосевших и сорванных капель в газе.

Среди известных конструкций центробежных сепараторов наибольшей простотой отличается коленный каплеуловитель [37] с вертикальным или горизонтальным подводом газов.

Коленный каплеуловитель (рисунок 1.10) представляет собой прямоугольное в сечении «колени» 1 с входным устройством 2 и узлом отвода отсепарированной жидкости в разрыве канала 3.

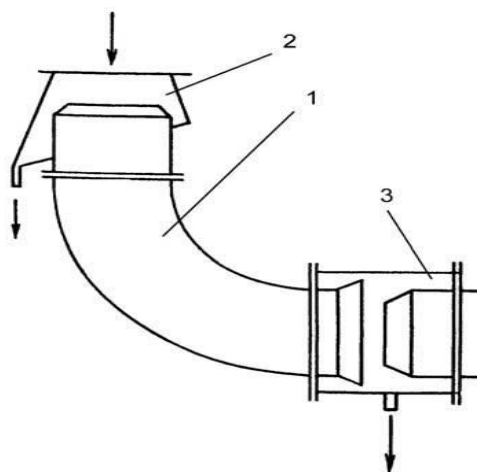


Рисунок 1.10 – Коленный каплеуловитель

Можно утверждать, что центробежные аппараты, использующие прямоточно-вихревой принцип движения потока в зоне сепарации, обладают простотой конструкции, низкой металлоемкостью и гидравлическим сопротивлением по сравнению с фильтрами. Благодаря высокой технологичности изготовления и низким эксплуатационным расходам, они перспективны с точки зрения их использования в технологии компрессорных станций различного назначения, хотя и несколько уступают фильтрам по степени очистки.

Фильтрационный способ очистки [38] основан на фильтрации газа с использованием керамических, тканевых, полимерных и иных материалов. Принцип действия основан на том, что газовый поток направляется на фильтр, в котором влага осаждается на фильтрующем элементе, проходя через фильтровальную перегородку. Интенсификация этого процесса возможна путем применения многослойных фильтров, каждый из которых улавливает свою фракцию, либо происходит предварительная коалесценция капель. За счет улучшения методов отвода жидкости происходит предотвращение срыва уловленных частиц.

Физико-химический способ [39] очистки газа основан на поглощении вещества, из которого состоят капли, твердыми активными веществами (адсорбция). Адсорбция газообразных примесей производится с помощью различных пористых активных веществ: активного угля, силикагеля, бокситов, цеолитов. Вредные примеси адсорбируются на поверхности поглотителя, а после его насыщения отгоняются продувкой горячим воздухом, газом или перегретым паром.

Часть процесса разделения – низкотемпературная сепарация (НТС) и низкотемпературная конденсация (НТК). Перспективной конструкцией является газодинамический сепаратор [40].



Рисунок 1.11– Газодинамический сепаратор

Основой газодинамических аппаратов являются газодинамические элементы вихревого типа. Физической основой очистки потока от гетерогенных примесей в аппаратах вихревого типа является наложение действия [3] на частицу центробежной силы, направленной перпендикулярно траектории(линии) движения вращающегося газового потока и вихревых сил. Результирующая сила, действующая на частицу, обеспечивает выведение частицы из газового потока на внутренние цилиндрические стенки аппарата и через специальные окна – в сборники шлама. Газодинамические аппараты позволяют обеспечить [40] следующие возможности:

- очистку газового потока от механических и аэрозольных примесей (капельных жидкостей) с эффективностью до 95% и размером частиц от 8 мкм;
- процесс коалесценции (укрупнение) капель жидкости;
- сепарацию газа от жидкости;
- вторичную сепарацию жидкости от газа в каплеуловителе;
- эффективное отделение газа от жидкости с последующей коалесценцией дисперсной фазы в 3-фазных средах (газонефтяной конденсат, нефть с большим газовым фактором).

Выше были рассмотрены конструкции различных сепараторов. В зависимости от требования к конечному продукту, его химической активности, объемного расхода идет подбор оптимального типа оборудования, а соответственно, и организации технологических потоков.

1.3. Гидродинамические факторы, влияющие на интенсивность сепарации

На процесс сепарации в инерционных жалюзийных элементах оказывают влияние как геометрические и конструктивные особенности сепарационного оборудования [41–43], так и гидродинамическая обстановка в зоне сепарации, характеризующаяся рядом гидродинамических параметров: скоростью и направлением движения (режимы течения), полями давлений в области движения капель.

Качество разделения инерционных сепараторов зависит от диаметра подводящего канала, скорости потока, а также конструктивного оформления зон, обеспечивающих формирование потока, сепарацию и выделение дисперсной фазы. Размеры сепаратора определяются производительностью и требуемой эффективностью разделения. Наиболее существенное влияние на величину уноса дисперсной фазы из аппарата и соответственно эффективность разделения оказывает скорость газа, от величины которой зависят массовые силы, действующие на капли.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования сепараторов показывают, что в общем случае эффективность разделения зависит от начальной концентрации дисперсной фазы, скорости потока, конструктивных особенностей и основных параметров сепаратора, а также характеристик распределения частиц по размерам [41]. Эффективность работы сепараторов в значительной степени определяется величиной уноса дисперсной фазы паровым или газовым потоком. В некоторых случаях унос может существенно снизить общую эффективность сепаратора.

Сложность гидродинамических процессов в турбулентном потоке делает строгое аналитическое решение задачи о сепарации дисперсных частиц с учетом вторичного уноса практически невозможным. Для этой цели можно использовать

данные экспериментальных исследований о скорости уноса частиц с поверхности канала турбулентным потоком.

При конденсационном разделении в сепараторах [43] основным режимом течения двухфазного потока является тот, который сопровождается течением пленки жидкости по стенке канала и попутным потоком газа или пара, несущего капли жидкости. Процесс разделения осуществляется в несколько основных этапов: насыщение аэродисперсного потока паром, конденсационное укрупнение частиц, выделение дисперсной фазы.

Аэрозольные частицы в парогазовой смеси выполняют роль активных [42] центров конденсации, и при достижении соответствующих условий для начала процесса на их поверхности образуются сначала отдельные ядра конденсации (мелкие капли новой фазы), а затем сплошной слой жидкости, толщина которого в дальнейшем продолжает увеличиваться, приводя к укрупнению и утяжелению частиц. При этом смачиваемость и растворимость исходной частицы уже не играют существенной роли, так как конденсация фактически происходит на поверхности жидкого слоя.

Скорость конденсации и диаметр капли для стационарного случая (при постоянной температуре и давлении) и идеального пара можно рассчитать по уравнению Максвелла [44]. При охлаждении парогазовой смеси, движущейся вдоль более холодной поверхности, происходит перенос тепла и конденсации влаги через прилегающий к ней пограничный слой газа. Если в смеси имеется дисперсная фаза (жидкие аэрозольные частицы), то конденсация происходит не только на поверхности канала, но и на частицах. Соотношение между массами конденсата, образующегося на частицах и на охлаждаемой поверхности канала, зависит от величины пересыщения и концентрации в смеси дисперсной фазы. При большом количестве центров конденсации в потоке на них конденсируется значительно большее количество пара, чем на стенках канала.

Расчеты и экспериментальные исследования показывают [45], что конденсационное укрупнение позволяет в обычных условиях увеличить размер частиц от 1 до 10–15 мкм. Конечный размер частиц в значительной степени определяется величиной поверхностной плотности теплового потока и при скорости газа более 30 м/с и численной концентрации более 10^{12} м³ слабо зависит от скорости и начального размера, так как в этом случае объем конденсата, образовавшегося на каждой частице, гораздо больше первоначального объема самой частицы. Конденсационное укрупнение частиц в парогазовом потоке целесообразно проводить при сравнительно низких концентрациях дисперсной фазы (до 10^{12} м³), высоких тепловых нагрузках и малых скоростях потока (до 30 м/с). При более высоких концентрациях небольшой объем жидкой фазы на каждой частице не может привести к ее ощутимому укрупнению. Увеличение скорости потока приводит к росту энергозатрат на проведение процесса при незначительном увеличении конечного размера частиц.

Механизм осаждения частиц на стенку канала в конденсационном центробежном сепараторе аналогичен другим жалюзийным сепараторам [7]. При малой скорости дисперсная фаза не успевает отсепарироваться, а при больших – увеличивается вторичный унос вследствие увеличения полной скорости потока на границе раздела фаз. При скоростях, существенно больших оптимальных значений (выше 35–40 м/с), величина уноса уже практически не зависит от угла поворота жалюзи, что, видимо, свидетельствует о срыве пленки исключительно турбулентными пульсациями газа.

При расчете и проектировании определенного вида оборудования необходимо учитывать распределение скоростей перед входом в сепаратор, чтобы не допустить наличия большого вторичного уноса. Также следует обратить внимание на процесс конденсации и коагуляции капель при движении по каналам.

1.4. Движение газа и жидкости в инерционных сепараторах

Для описания работы инерционных сепараторов необходимо отдельно обрисовать движения газовой и жидкостной фаз.

Сложность моделирования и расчета высокоинтенсивного межфазного взаимодействия в газожидкостном турбулентном потоке обусловлена, в первую очередь, сложной природой большинства процессов, связанных с трехмерным турбулентным пульсационным движением сплошной и дисперсной фаз.

Традиционный подход к изучению таких систем базируется на фундаментальных законах классической механики, механики жидкости и газа, физической химии. Однако при моделировании аппаратов с интенсивным взаимодействием фаз, учитывая неоднородность структуры потоков и неравномерность распределения параметров, необходимо наряду с детерминированными использовать вероятностно-стохастические методы и модели. В общем случае должны учитываться следующие случайные факторы: полидисперсный состав дисперсной фазы и его изменение во времени, стохастический характер движения и различное время пребывания частиц в объеме аппарата, флуктуации относительных скоростей фаз.

Рассматриваемые в настоящей работе инерционно-фильтрующие сепараторы включают в себя жалюзийные элементы. Для описания движения в каналах, представляющих собой жалюзийные элементы [46–50], приведена схема на рисунке 1.12.

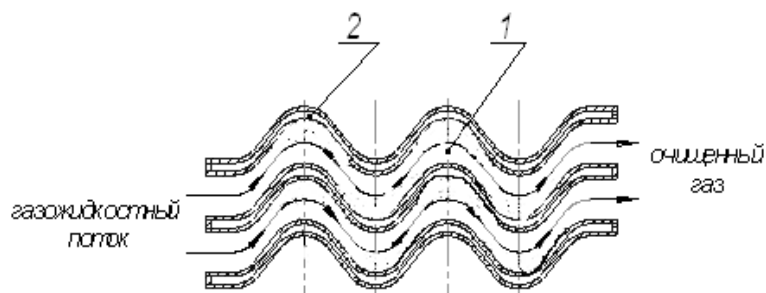


Рисунок 1.12 – Схема движения потоков в жалюзийном сепараторе:

1 – газожидкостный поток; 2 – жалюзи

В жалюзийный пакет устройства подводится газожидкостный поток, включающий дисперсную капельную влагу. Этот поток направляется в криволинейные каналы 1, образованные гофрированными пластинами 2, при прохождении которых под действием сил инерции траектории движения капель жидкости отклоняются от искривленной линии тока газового потока, огибающего криволинейные поверхности стенок каналов. Капли жидкости направляются на стенки гофрированных пластин 2, где вследствие инерционного столкновения и эффекта касания происходят их оседание и отвод за пределы сепаратора.

Так как возможна незначительная концентрация частиц в жалюзийном сепараторе, то следует рассматривать их как отдельные и не взаимодействующие между собой и принять поток монодисперсным [50]. При движении капля испытывает влияние различных сил, зависящих от скоростей капель и газового потока. Учитывая их влияние, можно рассчитать траекторию движения капель. Характерными размерами инерционных элементов являются радиус гофра и угол раскрытия, а также расстояние между гофрами. Уменьшение угла наклона стенок приводит к улучшению условий сепарации капель. При увеличении радиуса гофра поток движется плавнее, и поэтому уменьшается возможность появления завихрений.

Исходя из условий предотвращения вторичного уноса капель, газ можно принять несжимаемым и давление на вогнутой и выпуклой частях жалюзи будет разным, что приводит к различным значениям скоростей [49]. Под действием инерционных сил микропорции газа из ядра потока оттесняются к внешним стенкам, что приводит к повышению давления, а возле внутренних стенок происходит разрежение. На прямолинейных участках идет перераспределение поля скоростей и давлений, после чего на следующей гофре происходит тот же процесс. Таким образом, в криволинейных каналах устанавливается неравномерное поле скоростей и давлений, что приводит к возникновению поперечного градиента.

Так как концентрация капель в газе обычно принимают небольшой, то соответственно газовый поток формирует гидродинамическую обстановку. Поэтому вначале для расчета гидродинамики жалюзийных элементов необходимо рассматривать движение газовой фазы. Для описания ее движения в криволинейных каналах чаще всего используют дифференциальные уравнения [51], позволяющие учесть динамическое изменение системы в процессе движения, а также рассчитать параметры движения газа в определенный момент времени и в определенной точке исследуемого образца.

В качестве исходных уравнений наиболее часто используют систему уравнений Навье – Стокса. В векторном виде для несжимаемой жидкости записываются следующим образом [51]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad (1.1)$$

где ∇ – оператор Гамильтона; Δ – оператор Лапласа; t – время, $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторное поле скоростей, \vec{f} – векторное поле массовых сил.

Для решения задачи о нахождении значений скоростей и давлений в систему уравнений Навье–Стокса добавляют краевые и начальные условия. Для полного определения системы уравнений, получающихся в результате записи уравнения в проекции на каждую из осей координат, используют уравнение неразрывности. Оно выражает собой закон сохранения массы в элементарном объеме, то есть непрерывность потока жидкости или газа [51]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} v + v \operatorname{grad} \rho = 0, \quad (1.2)$$

где $\rho = \rho(x, y, z, t)$ – плотность потока жидкости (или газа);

$v = v(x, y, z, t)$ – вектор скорости жидкости (или газа) в точке с координатами (x, y, z) в момент времени t .

При анализе физических процессов и свойств среды приведенные дифференциальные уравнения преобразуются и решаются в основном численными методами. В результате вычислений поля скоростей и давлений можно определить гидравлическое сопротивление сепарационного элемента.

В настоящее время газовая динамика многофазных сред развивается по нескольким направлениям, каждое из которых опирается на модели, где во главе угла лежит ряд упрощающих допущений, позволяющих применить современный математический аппарат для качественного описания картины течения. Такой подход связан со сложностью структуры двухфазной среды, наличием тепло- и массообменных процессов, фазовых переходов. Большой вклад в теорию движения двухфазных сред внесли работы С.С. Кутателадзе [41], Н. А. Слезкина, С. Г. Телетова, Ф. И. Френкеля, Х. А. Рахматуллина. Для описания картины течения использовались разнообразные физические модели [7], такие как движение в пористой среде, усредненные уравнения движения с учетом фазовых переходов, усредненные уравнения без фазовых переходов и пр.

Наиболее хорошо поддаются математическому описанию модели течения, в которых дисперсная фаза равномерно распределена по всему объему, так как в этом случае возможно применение хорошо развитого аппарата дифференциального исчисления.

Обычно в аппаратах химических технологий соотношения нагрузок по фазам и соответственно объемной части дисперсной фазы могут изменяться в

довольно широких пределах. Для математического описания течений, применяющегося при описании движения двухфазных потоков, [51] получили широкое распространение также модели раздельного движения фаз. Эта двухжидкостная модель рассматривает двухфазный поток как взаимопроникающий и взаимодействующий, который заполняет один и тот же объем. Для такой модели принимается условие, что дисперсная фаза распределена по всему объему, занятому двухфазным потоком, и параметры, описывающие состояние двухфазного потока, принимаются следующие: удерживающая способность или объемная часть по сплошной фазе, средняя скорость, температура, давление и другие параметры. К такой среде возможно применение способов механики сплошных сред с учетом того, что средняя скорость движения фазы определяется как среднеобъемная. При этом предполагается, что размер дисперсных частей, линейный масштаб гидродинамических процессов существенным образом меньше линейного размера, характерного для геометрии проточной части аппарата, в котором протекают эти процессы. В уравнения, описывающие законы сохранения массы и импульса дисперсной фазы, включаются составляющие, учитывающие соответствующий обмен между фазами внутри выделенного объема двухфазного потока.

Рассматриваемый подход к решению задачи о движении двухфазных дисперсных потоков в элементах проточной части химического оборудования предполагает в своей основе ряд различных допущений, что сказывается на достоверности получаемых количественных решений, но, с другой стороны, предположение об однородности среды позволяет для математического описания ее движения использовать аппарат дифференциального исчисления.

Пример такого подхода представляет работа Н. И. Зверева и С. Г. Ушакова в системах дифференциальных уравнений движения пылинки в полярных

координатах r и φ [52,53]. Уравнения движения в цилиндрических координатах записаны в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dW_r}{dt} = \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \frac{\pi\mu_\Gamma d_k}{8m} (V_r - W_r) \\ \frac{dW_\varphi}{dt} = -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \frac{\pi\mu_\Gamma d_k}{8m} (V_\varphi - W_\varphi) \end{cases} \quad (1.3)$$

где $\frac{dr}{dt} = W_r$; $\frac{rd\varphi}{dt} = W_\varphi$; W – скорость частицы (пылинки или капли);

W - скорость частицы (пылинки или капли); $dt=dr/W_r$; $dt=rd\varphi/W_\varphi$.

1.5. Основные гидравлические характеристики сепарационного оборудования

В связи со сложностью теоретического определения полей скоростей и давлений в криволинейных каналах сепараторов с жалюзийными элементами наиболее приемлемым методом определения коэффициента гидравлического сопротивления представляется его расчет через экспериментально определенное значение градиента давления. Но даже при этом необходимо учитывать множество факторов, влияющих на гидравлическое сопротивление, потому что этот параметр является важнейшей энергетической характеристикой работы оборудования.

Гидравлические потери в сепараторе состоят из потерь давления в местных сопротивлениях при расширении и сужении потока газа на входе и выходе сепаратора в свободном объеме, а также учитываются потери давления в жалюзийной секции. Потери давления при расширении и сужении потока определяют по известным формулам[7]:

$$\Delta P_{\rho} = \xi \cdot \frac{p \cdot (\omega_0)^2}{2}, \quad (1.4)$$

где ΔP_{ρ} - потери давления при расширении;

$$\Delta P_{\text{суж}} = \xi \cdot \frac{p \cdot (\omega_0)^2}{2}. \quad (1.5)$$

Потери на трение в свободном сечении сепаратора незначительны ввиду малых скоростей газа и небольшой длины сепаратора, поэтому ими можно пренебречь [30].

Потери давления в жалюзи секции определяют по формуле [7]:

$$\Delta P_{\text{скр}} = \xi \cdot \frac{p \cdot \omega^2}{2 \cdot g \cdot (F_a)^2} \cdot \frac{L}{m}. \quad (1.6)$$

Число Re вычисляют по формуле[54]:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho}{\mu \cdot g \cdot F_a}, \quad (1.7)$$

где $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр жалюзийной насадки, м, равный $4f/\Pi \cdot (r - \text{гидравлический радиус})$.

Для жалюзийной секции коэффициент живого сечения F_a , гидравлический радиус m и эквивалентный диаметр относятся к каналу. При этом площадь живого сечения, омываемый периметр и коэффициент живого сечения канала жалюзийной секции определяют по формулам[7]:

$$F = H \cdot a, \quad (1.8)$$

$$s = 2 \cdot (H + a), \quad (1.9)$$

$$Fa = \frac{a}{a + b}, \quad (1.10)$$

где H – высота канала, м; a – шаг между пластинами, м;

b – толщина пластины, м.

Полные потери давления на местные сопротивления и трение в сепараторе могут быть определены суммированием вычисленных величин:

$$\Delta p = \Delta p_p + \Delta p_{\text{суж}} + \Delta p_{\text{скр}} \quad (1.11)$$

Гидравлическое сопротивление инерционных каплеуловителей ΔP_c , Па, рассчитывается по формуле [55]

$$\Delta P_c = \frac{\zeta_c \omega^2 \rho_{\Gamma}}{2} \quad (1.12)$$

Коэффициент ζ_c для прямоточного сепаратора Карбейта равен 6,5, для горизонтальной сетки при толщине насадки 100 мм составляет 1,8, для жалюзийных сепараторов ζ_c определяется по формулам, приведенным ниже [55]:

- для горизонтальных, вертикальных и наклонных (угол наклона 40 – 45°) пакетов волнистого профиля

$$\zeta_c = (2,5n\zeta' + 0,4)ctg^2 a; \quad (1.13)$$

- для вертикальных и горизонтальных пакетов уголкового профиля

$$\zeta_c = (2,4n - 2)ctg^2 a ; \quad (1.14)$$

- для наклонных пакетов уголкового профиля

$$\zeta_c = (1,8n - 0,9)ctg^2 a \quad , \quad (1.15)$$

где ζ_c – коэффициент, который можно принять равным 0,20–0,25; n – число ступеней сепарации (количество секций в одной изогнутой пластине жалюзийного сепаратора), обычно $n=4$.

Таким образом, для определения гидравлического сопротивления рассматриваемых новых инерционно-фильтрующих сепараторов необходимо провести физические исследования для определения коэффициента сопротивления ζ_c .

1.6. Движение капель жидкости в фильтрующих элементах и гидравлические характеристики таких элементов

К гидравлическим характеристикам фильтрующих элементов относятся такие параметры[30]:

- перепад давления на фильтре (потери давления, затрачиваемые на преодоление гидравлического сопротивления при прохождении потока через все элементы фильтрующего слоя, а также через устройства подвода и отвода рабочего тела);
- величина скорости или расхода рабочего тела через фильтр.

Характер связи между этими параметрами зависит от многих факторов. Наиболее важными из них являются следующие: толщина слоя, размер пор, режим течения рабочего тела, распределение скорости движения рабочего тела во всем объеме фильтра.

Общее выражение для расчета потерь давления на любом гидравлическом местном сопротивлении записывается следующим образом [54]:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho \omega^2}{2}, \quad (1.16)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ – плотность рабочего тела; ω – скорость движения рабочего тела.

Для описания движения капли необходимо знать поле скоростей и давлений в сечении канала. В общем случае уравнение движения капли сформулировано вторым законом Ньютона:

$$\bar{F} = m\bar{a}, \quad (1.17)$$

где \bar{F} – сумма всех сил, действующих на каплю (массовые, инерционные и т.д.), Н; \bar{a} – суммарное ускорение движения капли; m – масса капли.

В зависимости от начальных и граничных условий протекания процесса составляющие сил и ускорений могут изменяться. Аналитическое выражение для определения суммарных сил и ускорений получают в результате разработки и анализа физической модели. В процессе изучения какого-либо процесса выбирают оптимальную систему координат (прямоугольную, цилиндрическую, сферическую), на каждую ось проецируя векторное уравнение (1.17), и принимают ряд допущений. В результате получается система уравнений в проекциях на оси координат, решая которую определяют поля скоростей и давлений.

1.7. Основные преимущества инерционно-фильтрующих сепараторов

В результате сравнительного анализа [56] различных методов сепарации установлено, что высокоэффективное разделение двухфазных систем может быть достигнуто при использовании инерционно-фильтрующего оборудования. Схема геометрии каналов и движения потоков в инерционно-фильтрующих сепараторе приведена на рисунок 1.13.

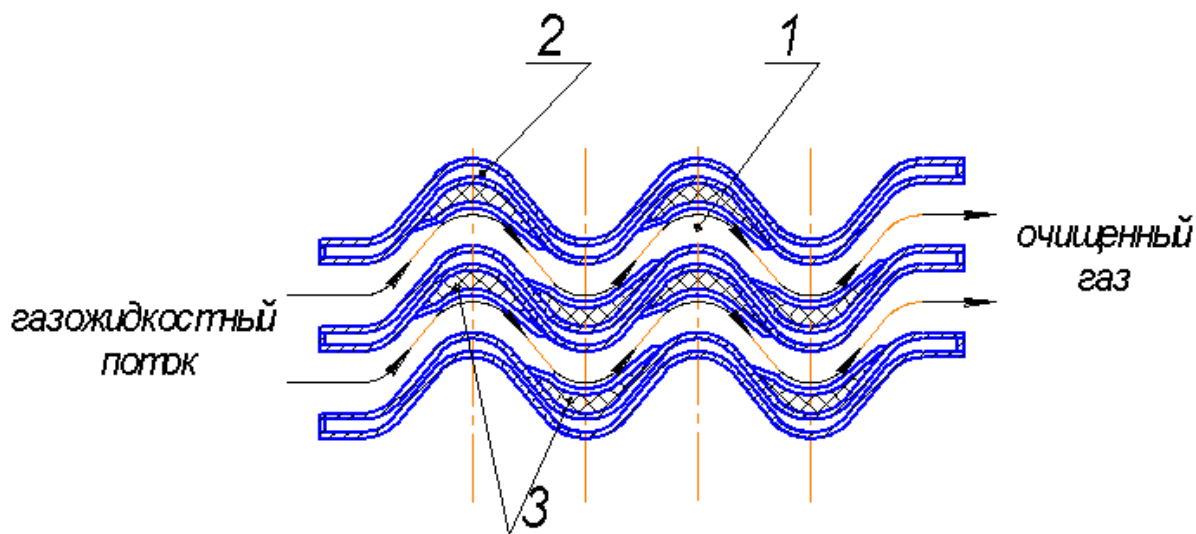


Рисунок 1.13 – Схема движения потоков в инерционно-фильтрующем оборудовании:

1 – газожижкостный поток; 2 – жалюзи; 3 – фильтрующие элементы

В инерционно-фильтрующих сепараторах составной частью является жалюзийный пакет [56], представляющий собой криволинейные каналы 1, образованные гофрированными пластинами 2. Под действием центробежных сил капли жидкости перераспределяются по сечению криволинейного канала. Часть потока, наиболее насыщенная каплями жидкости, направляется на полосы из волокнистого материала 3, где вследствие инерционного столкновения и эффекта касания происходит улавливание капель. Далее, в результате протекания вторичных процессов осаждения вновь поступающих капель на уже осажденных и капиллярных явлений в волокнистом материале происходят увеличение среднего размера частиц дисперсной фазы и их последующее гравитационное осаждение. Слой полос из волокнистого материала насыщается уловленной жидкостью, отводящейся в виде пленки по поверхности гофрированных пластин и далее – из сепаратора [56].

Основные преимущества таких аппаратов – возможность эффективного разделения в широком диапазоне расхода газа и концентрации дисперсной фазы при сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении, надежность и

простота конструктивного исполнения. При примерно равных затратах энергии и производительности инерционно-фильтрующих сепараторы превосходят обычные инерционные элементы по эффективности разделения, а фильтрующие – по объему и производительности обрабатываемых сред.

Таблица 1.1

Сравнительные характеристики инерционных и фильтрующих устройств [56]

Параметр	Жалюзийные устройства	Фильтры
Эффективность, %	70-95	98-99,99
Скорость движения потока, м/с	3-5	0,05-2,5
Гидравлическое сопротивление, Па	100-500	до 2500

Замена на некоторых производствах инерционных сепараторов на инерционно-фильтрующих позволяет значительно снизить унос, повысить эффективность разделения и обеспечить стабильную работу в широком диапазоне режимных параметров.

Новый способ организации потоков был разработан совсем недавно, но уже имеются работы по его усовершенствованию и исследованию. Предпринимаются попытки по оптимизации геометрических размеров и режимных параметров эксплуатации.

Таким образом, преимуществами инерционных уловителей являются их малое гидравлическое сопротивление, скорость движения потока, а недостатком – малая эффективность.

Преимуществом же фильтрующих элементов является высокая степень очистки газов, а недостатками – их большое гидравлическое сопротивление и малая скорость фильтрации [57].

В последнее время было разработано инерционно-фильтрующее оборудование, объединяющее преимущества обоих механизмов разделения [46]. Такой сепаратор имеет высокую степень разделения, малый брызгоунос и гидравлическое сопротивление, но характеристики таких элементов еще малоизучены и не существует математического аппарата для их прогнозирования.

На выходе из сепаратора остается незначительная часть влаги, ее содержание зависит от типа фильтрующего элемента. Исследование различных типов фильтрующих элементов в данном устройстве является первоочередной задачей для составления универсальной методики расчета всего элемента.

1.8. Основные направления теоретического и экспериментального исследования сепарационных характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов

инерционно-фильтрующиесепараторы объединяют в себе два вида оборудования. Это инерционные и фильтрующие элементы. Таким образом, и преимущества этих двух различных видов оборудования сохраняются и тоже объединяются. Но каждый из рассматриваемых элементов также имеет свои недостатки, которые необходимо учитывать, изучая их влияние, так как в противном случае проектирование новых конструкций сепараторов может привести к значительному снижению эффективности разделения газожидкостных смесей. Вследствие того, что одним из преимуществ инерционно-фильтрующего сепаратора является более низкое, по сравнению с фильтрами, сопротивление, что соответствует современным требованиям снижения энергозатрат на любых видах производств, и актуально исследование гидравлических характеристик данного вида оборудования. Гидравлическое сопротивление – функция многих гидродинамических факторов, влияние которых пока не исследовано, и задачей данной диссертационной работы является изучение гидродинамических характеристик инерционно-фильтрующихсепараторов.

Выводы к разделу 1

- Для достижения цели диссертационной работы, а именно: определение гидродинамических характеристик сепаратора, а также влияния конструктивных и технологических факторов на интенсивность и эффективность протекания процессов сепарации, проведен анализ известных способов интенсификации процессов сепарации капель из газодисперсных потоков, основных направлений развития инерционно-фильтрующей техники и технологий газоочистки, дана характеристика основных гидродинамических факторов и их влияния на гидравлическое сопротивление, которое обуславливает интенсивность и эффективность процессов разделения в инерционно-фильтрующих сепараторах, в результате чего на основе литературного обзора поставлен ряд задач, которые нужно решить для достижения цели диссертационной работы:

- разработать физическую модель движения газок капельных потоков в жалюзийных блоках инерционно-фильтрующих сепараторов и провести дальнейшее математическое моделирование гидродинамики в криволинейном инерционном сепарационном канале с фильтрующими элементами – это является основой для теоретических расчетов скорости и траектории движения газожидкостного потока и капель жидкости, гидравлического сопротивления и эффективности сепарации;

- экспериментально исследовать работу инерционно-фильтрующих сепараторов в различных гидродинамических режимах, оценить их влияние на эффективность процесса сепарации, определить основные сепарационные характеристики;

- разработать инженерную методику гидродинамического расчета сепарационных характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов с определением оптимальных конструктивных и геометрических параметров сепарационных элементов;

- провести апробацию и промышленное внедрение полученных научных результатов и практических рекомендаций к проектированию инерционно-фильтрующих сепараторов.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ИНЕРЦИОННО-ФИЛЬТРУЮЩИХ СЕПАРАТОРОВ

2.1. Разработка физической модели движения газок капельных потоков в рабочей полости инерционно-фильтрующих сепараторов

Для описания физической модели движения как капельного, так и газового потоков в каналах инерционно-фильтрующих сепараторов необходимо вначале определиться с геометрией жалюзийных элементов, так как их геометрия, абсолютные размеры оказывают определяющее значение на формирование газового потока, который, в свою очередь, формирует поток капель жидкости.

Для решения математической задачи о движении газового и капельного потоков в каналах инерционно-фильтрующего сепаратора требуется внести некоторые упрощающие предположения и допущения, которые позволяют задачу о трехмерном движении вязкого газового потока свести к решению задачи о движении двухмерного потока газа.

В основе таких допущений лежит большая разница между размерами жалюзийных каналов. Так, ширина жалюзийного канала измеряется от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров. Высота жалюзийного канала превышает его ширину в десятки раз, а в некоторых случаях – и на несколько порядков. Такое соотношение размеров оказывает влияние на скорости газового потока. Они зависят от объемного расхода газа и достигают десятков метров в секунду, в то время как перетоки газа по высоте канала определяются интенсивностью турбулентного перемешивания и течение газа в этом направлении практически отсутствует.

Данная картина движения газового потока позволяет свести математическое

описание задачи о движении газового потока в жалюзийных каналах инерционно-фильтрующего сепаратора как двумерной задаче о движении газа в плоскости, перпендикулярной жалюзийным стенкам инерционно-фильтрующего сепаратора. Данное упрощение выражается в отсутствии составляющей полной скорости газового потока вдоль вертикальной оси жалюзей инерционно-фильтрующего сепаратора.

Для упрощения математического описания геометрии стенки жалюзи можно исходить из предположения о том, что жалюзийные стенки всех каналов одинаковы, и их конфигурация соответствует синусоидальному закону изменения вдоль канала, что достаточно точно соответствует действительности, так как волнистую поверхность жалюзи достаточно точно можно описать тригонометрической функцией.

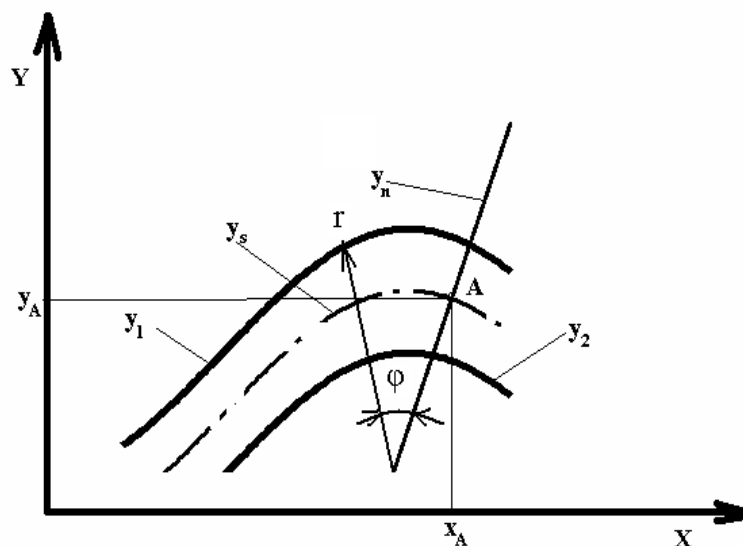


Рисунок 2.1 – Схема жалюзийного канала инерционно-фильтрующего сепаратора: y_1 – линия, определяющая геометрию левой стенки канала; y_2 – линия определяющая геометрию правой стенки канала; y_s и y_n – линии определяющие геометрию средней линии канала и нормали к ней соответственно; r и φ – цилиндрические координаты

Предполагаемая модель геометрии жалюзийного канала представлена на рисунке 2.1, где показано расположение двух синусоидальных стенок, образующих жалюзийный канал. В нем можно выделить среднюю линию, характеризующую геометрию канала, и нормаль к этой линии. Предполагается, что составляющая полной скорости газового потока перпендикулярная к этой нормали средней линии жалюзийного канала и определяет в целом расход газа по этому каналу.

Таким образом, можно записать функциональную зависимость, определяющую координаты левой стенки жалюзийного канала:

$$y_1 = a \sin (bx + c) + d_1. \quad (2.1)$$

Подобную функциональную зависимость можно записать и для правой стенки жалюзийного канала:

$$y_2 = a \sin (bx + c) + d_2. \quad (2.2)$$

Тогда для любой точки «А», расположенной на средней линии канала (Рисунок 2.2), можно записать выражение

$$y_A = a \sin (b x_A + c) + \frac{1}{2} d_1 + \frac{1}{2} d_2. \quad (2.3)$$

А выражение линии, проходящей по нормали в точке «А» средней линии, имеет вид

$$y_A = \frac{-x + x_A + a \cos (bx_A + c) b y_A}{a \cos (bx_A + c) b}. \quad (2.4)$$

Расположение фильтрующих элементов в жалюзийном канале показано на рисунке 2.2. Предполагается, что ширина этих элементов небольшая по сравнению с шириной жалюзийного канала, что позволяет на первой стадии расчетов не

учитывать стеснение потока газа в жалюзийном канале фильтрующей вставкой.

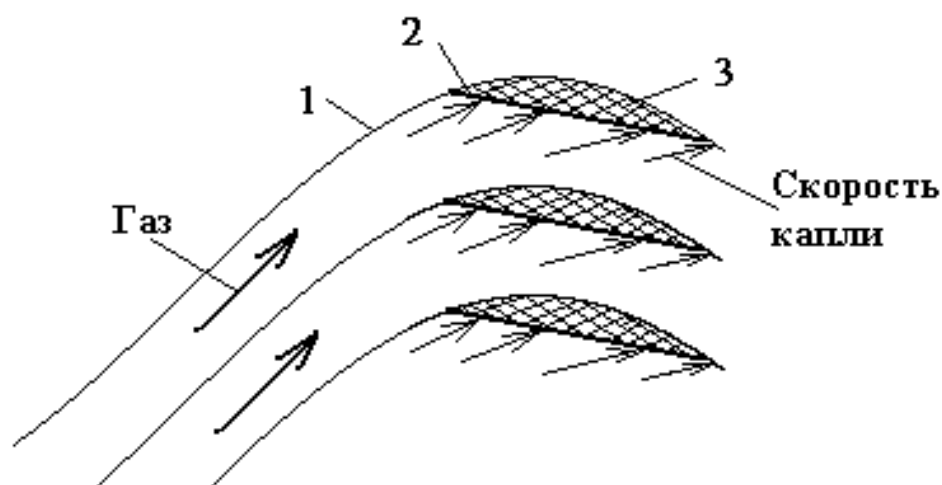


Рисунок 2.2 – Схема жалюзийных каналов инерционно-фильтрующего сепаратора с фильтрующими элементами: 1 – стенки канала; 2 – поверхность фильтрующей вставки; 3 – фильтрующая вставка

Рассмотренная геометрия жалюзийных каналов инерционно-фильтрующего сепаратора дает возможность разработать физическую модель движения газового потока и движения капель в этих каналах.

Для более подробного анализа каждой гофры и всего канала введем понятие глобальной системы координат, в которой изображен и рассчитывается весь канал (в качестве этой системы используется декартовы координаты (x, y)). Также локальная система координат – цилиндрическая (координаты (r, φ)). Для их взаимосвязи используем стандартные алгебраические выражения [58], в нашем случае – координата $x = r \cos(\varphi)$, $y = r \sin(\varphi)$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\varphi = \arctan(y/x)$.

Взаимосвязь для проведения расчетов между глобальной (декартовой) и локальными (цилиндрическими) системами координат для канала инерционно-фильтрующего сепаратора приведена на рисунке ниже.

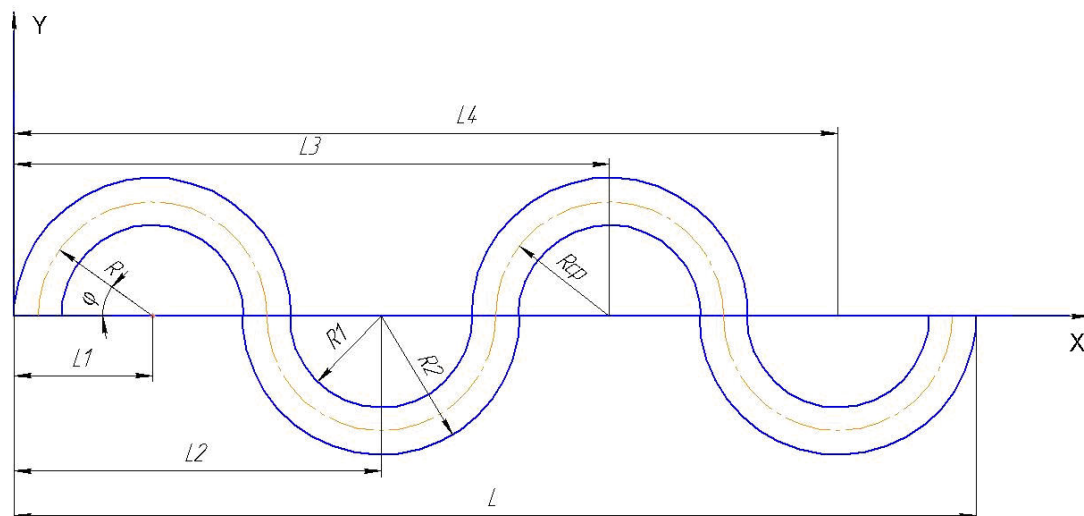


Рисунок 2.3 – Криволинейный канал в глобальной Декартовой и локальной цилиндрической системах координат:

L – общая длинная канала; $L1-L4$ – расстояние до центров локальных систем координат каждой гофры; $R1$ и $R2$ – внутренний и внешний радиусы полукольца; R , φ – локальные координаты; X , Y – глобальные координаты; R_{cp} – средний радиус

Положение расчетного участка (полукольца) определяется по соотношению, приведенному ниже:

- задается координата X , мм, если расчетная точка меньше, чем $2R2$, то координата X берется по выражению: $X_1=X$, а координата Y – со знаком «+»;
- если расчетная точка находится в диапазоне $2R2 < X < 4R2$, то координата X берется по выражению $X_2=X-2R2$, а координата Y – со знаком «-»;
- если расчетная точка находится в диапазоне $4R2 < X < 6R2$, то координата X берется по выражению $X_3=X-4R2$, а координата Y – со знаком «+»;
- если расчетная точка находится в диапазоне $6R2 < X < 8R2$, то координата X берется по выражению: $X_4=X-6R2$, а координата Y – со знаком «-».

Алгоритм расчета скорости газа в любой точке канала:

- задаем координаты точки в декартовой системе координат;
- определяем диапазон, в который попадает расчетная точка, согласно вышеприведенным выражениям, подбираем то, по которому считаем скорость;
- рассчитываем составляющие скорости газа в локальных системах (r, φ) и глобальной системе (X, Y) согласно выражениям, приведенным в приложении К.

В результате расчетов получено 8 выражений для составляющих скорости (V_f , V_r) в локальных системах координат (r, φ) и 8 выражений – для составляющих скорости в глобальной системе координат (X, Y) .

2.1.1. Формирование потока капель

Капли жидкой фазы (конденсата) формируются в потоке попутного нефтяного и природного газов, начиная от пласта до самого входа в сепаратор [50]. По мере разработки месторождения и движения газа от пласта к сепаратору, давление и температура непрерывно меняются. Термодинамическое равновесие всей двухфазной многокомпонентной системы изменяется, и происходит процесс массообмена между фазами (конденсация и выпаривание) [50]. Таким образом, движение газок капельных потоков по трубопроводам и сепарационным каналам нефтегазового оборудования сопровождается резким изменением значений термодинамических параметров с соответствующими составом и соотношением жидкостной и газовой фаз, постоянно меняющихся. Механизм образования жидкостной фазы в таком случае основан на процессе адиабатического расширения, при котором увеличивается объем смеси, снижаются давление пара и температура, потому что работа осуществляется за счет внутренней энергии газа [59,60]. При снижении температуры уменьшается давление насыщенного пара, приводящее к пресыщению и конденсации в дальнейшем. Скорость процесса конденсации на поверхности капли определяется диффузией пара к этой

поверхности. При ускоренном пресыщении скорость диффузии может быть недостаточной, приводя к значительному образованию зародышей, что является негативным в процессе сепарации. Подобные процессы выявлены в исследовательских работах, направленных на изучение новых инерционно-фильтрующих сепараторов [50].

Конденсация приводит к образованию мелких капель, размер которых меняется за счет конденсационного роста в условиях пресыщения и коагуляции, а также измельчения в турбулентном газовом потоке, что являются основными механизмами формирования капли [59]. При отсутствии конденсации основными механизмами формирования капель в турбулентном потоке газа являются процессы измельчения и коагуляции, протекающие одновременно [60].

Известно, что капли в потоке газа измельчаются, если их радиус превышает некоторый критический [59]. Капли радиусом меньше критического могут только коагулировать. Так как плотности капли и окружающего ее газа сильно отличаются, измельчение капли происходит за счет инерционных сил. Установленное определенное распределение капель по размерам имеет вид логарифмически нормального распределения [59].

Учитывая вышесказанное, целесообразно провести поиск новых способов обработки газожидкостных потоков, обеспечивающих высокую эффективность разделения и проектирования высокоэффективного инерционно-фильтрующего газосепарационного оборудования, позволяющего изымать влагу даже в виде конденсационного тумана [60]. Поэтому при создании адекватного математического описания газодинамики движения газожидкостного потока для инерционной и фильтрующей секций газосепаратора необходимо рассмотреть физические процессы, происходящие в сепарационных каналах и фильтрующих секциях инерционно-фильтрующих газосепараторов.

Как было показано в предыдущем разделе, канал инерционно-фильтрующего

сепаратора представляет собой криволинейную, непрерывно изменяющую направление движения потока газа полость, в которой и установлены сепарационные элементы. Установка таких элементов должна соответствовать распределению капель жидкости по сечению жалюзийного канала. Это необходимо для того, чтобы максимальное количество капель жидкости, движущихся в газовом потоке по криволинейным траекториям, достигало бы поверхности фильтрующей вставки. Назначение же фильтрующей вставки – удержание жидкости вначале на поверхности этой фильтрующей вставки, то есть «захват», а затем отвод по ее внутренним каналам за пределы сепарационного пространства и самого инерционно-фильтрующего сепаратора.

Для выявления картины движения капель жидкости в криволинейном жалюзийном канале инерционно-фильтрующего сепаратора рассмотрим, какие силы оказывают воздействие на капли, и выясним природу их возникновения. На рисунке 2.4 показано направление силового воздействия на каплю со стороны газового потока и от центробежной силы.

Для упрощения математического описания рассматриваемого взаимодействия и движения газового и капельного потоков принимаем во внимание малый размер рассматриваемых капель (несколько мкм), а также малую объемную концентрацию капель в газовом потоке. Это позволяет для анализа механизма движения капель рассматривать одиночную каплю жидкости, имеющую размер, характерный для всего потока. Так как величина центробежной силы зависит от радиуса траектории криволинейного движения капли, то с достаточной для инженерных расчетов точностью можно заменить рассматриваемый участок криволинейного жалюзийного канала криволинейным каналом с радиусами стенок R_1 и R_2 . Направление действия центробежной силы F_c и силы аэродинамического сопротивления, увлекающей капли в совместное с потоком газа движение, F_s , показано на рисунке 2.4. Направление действия этих сил удобно рассматривать в

цилиндрической системе координат, расположение которой также показано на этом рисунке.

Величины сил сопротивления и центробежных сил соответственно равны и определяются следующими выражениями:

$$F_s = \psi \frac{\pi}{8} V_\varphi^2 d_k^2 \rho_\Gamma, \quad (2.5)$$

$$F_c = \frac{\pi d_k^3}{6} \rho_g \frac{W_\varphi^2}{r}, \quad (2.6)$$

где W_φ - окружная скорость капли, направление которой перпендикулярно радиусу кривизны жалюзийного канала в данной точке; V_φ - скорость газового потока в окружном направлении.

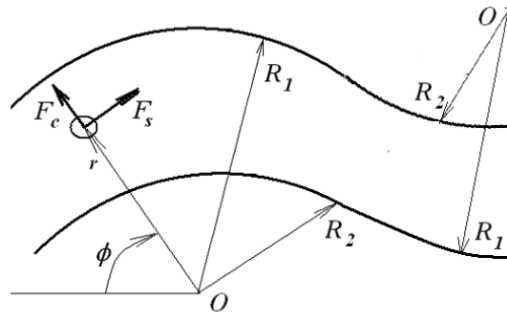


Рисунок 2.4 – Схема действия сил на каплю при движении в канале инерционно-фильтрующего сепаратора: R_1 – радиус внешней стенки жалюзийного элемента; R_2 - радиус внутренней стенки жалюзийного элемента; F_c – центробежная сила, действующая на каплю; F_s – сила сопротивления, действующая на каплю; r и ϕ – цилиндрические координаты

Рассматривая математические выражения для определения центробежных сил и сил сопротивления, можно увидеть, что обе эти величины зависят от величины окружной скорости капли жидкости. Определив эту величину или величину окружной составляющей газового потока, можно, проанализировав

траекторию движения капли в криволинейном канале, сделать вывод о необходимом количестве криволинейных элементов по длине жалюзийного канала, требующихся для обеспечения нужной сепарационной эффективности инерционно-фильтрующего сепаратора, а также месте оптимального расположения фильтрующих вставок.

Если учесть, что жалюзийный канал имеет периодически изменяющееся направление и соответственно изменяющееся направление движения газового потока, то и направление действия центробежных сил в канале будет изменяться. Наиболее результативным было бы движение двухфазного потока, при котором за один его поворот все капли жидкости достигали бы стенки с радиусом R_1 (в дальнейшем будем называть эту стенку внешней стенкой жалюзийного канала), оседали бы на ней в виде пленки и сразу отводились за пределы сепаратора.

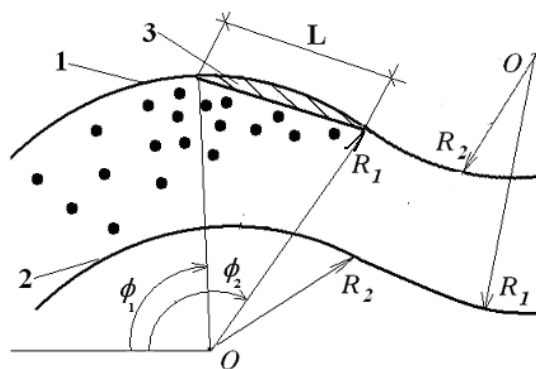


Рисунок 2.5 – Схема жалюзийных каналов инерционно-фильтрующего сепаратора с фильтрующими элементами: 1 – внешняя стенка канала; 2 – внутренняя стенка канала; 3 – фильтрующая вставка; L – длина фильтрующей вставки;

ϕ_1 и ϕ_2 – цилиндрические координаты, в пределах которых располагается фильтрующая вставка

Но, как было показано в предыдущих главах, при достижении каплями внешней стенки канала происходит образование пленки жидкости, которая под

действием газового потока продолжает движение по этой стенке. В следующем жалюзийном элементе поток меняет свое направление вдоль оси y (рисунок 2.5), и стенка с радиусом R_1 плавно переходит к радиусу R_2 , которая для последующего жалюзийного элемента является уже внутренней стенкой.

При изменении кривизны канала на противоположное направление происходит срыв пленки и возникает вторичный брызгоунос. Назначением же фильтрующих вставок является улавливание капель на внешней стенке жалюзийного канала и отвод за его пределы. Это предотвращает вторичный брызгоунос и повышает эффективность сепарации сепараторов.

На рисунке 2.5 схематически показано, как под действием центробежных сил формируется, а точнее группируется, становится более плотным поток капель у внешней стенки жалюзийного элемента. Задачей математического описания является создание методики расчета геометрии фильтрующей вставки, места ее установки в жалюзийном элементе (определение координат начала и окончания эффективного улавливания жидкости с учетом достаточно плотного потока капель), ее продольных размеров вдоль жалюзийного канала.

2.1.2. Формирование поля скоростей газового потока в криволинейном канале инерционно-фильтрующего сепаратора

После прямолинейных участков на входе сепарационного канала, переходят криволинейных к прямолинейным (конфузорным) участкам, локальные скорости газового потока монотонно увеличиваются, а на диффузорных участках, оборудованных фильтрующими секциями, происходит уменьшение скорости газового потока. На этом участке со снижением скорости газожидкостного потока уменьшается аэродинамическая сила, увлекающая дисперсные частицы за основным газовым потоком, облегчая движение частиц

по инерции к пласту фильтра и усиливая эффективность сепарации. Кроме того, увеличивается давление в дренирующих каналах двойных жалюзийных гофрированных пластин, что содействует стабильному стеканию и отводу уловленной жидкости, а также работе фильтрующих элементов в режиме самоочищения. По достижению стационарного режима сопротивления эффективность сепарации, количество удерживаемой жидкости в фильтрующем пласте и истекающей жидкости из него остаются постоянными во времени при неизменной скорости фильтрования, при этом количество мигрирующей жидкости равняется количеству жидкости, попадающей в пласте фильтра. Граница разделения инерционной зоны сепарационного канала и фильтрующей секции представляет собой условную стенку (граница свободной струи), на которой скорость газового потока имеет постоянное значение, соответствующее постоянному давлению по сечению фильтра в дренирующих каналах. Особое внимание следует уделить профилированию криволинейных участков сепарационного канала, где самые большие потери напора и сопротивления связаны с отрывом потока. Возможность отрывного течения ограничивает градиент скорости (давления) на стенках сепарационного канала. Согласно теоретическим и экспериментальным данным зоне безотрывного течения отвечает уменьшение скорости газа не больше чем на 25% на длине стенки, равняющейся ширине сепарационного канала [61]. Причем, по рекомендациям, общее снижение скорости на них не должно превышать трехкратное.

В качестве рассматриваемой геометрии жалюзийного канала инерционно-фильтрующего сепаратора принимаем криволинейный канал, геометрия которого изображена на рисунке 2.5. Движение вязкого газового потока в таком криволинейном канале удобно описывать системой уравнений Навье–Стокса в цилиндрической системе координат (2.5). Турбулентный характер движения потока газа можно учесть путем замены коэффициента кинематической вязкости на

коэффициент турбулентной вязкости, что для осесимметричных, вихревых потоков позволяет в некоторых случаях получать аналитические решения поставленных гидродинамических задач [51]. Для того чтобы замкнуть данную систему уравнений Навье–Стокса, дополняем ее четвертым уравнением неразрывности. В результате получаем систему из четырех уравнений с четырьмя неизвестными (3 проекции скоростей газового потока на три оси и величина давления).

$$\left\{ \begin{array}{l} V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \\ + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_r}{r^2} \right), \\ V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r V_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \\ + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right), \\ V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \\ + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} \right), \\ \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0. \end{array} \right. , \quad (2.7)$$

Для преобразования данной системы уравнений с целью получить вид, в котором можно найти аналитическое решение, вводим ряд упрощающих предположений и допущений. В связи с тем что основное движение газового потока происходит вдоль криволинейного жалюзийного канала, предполагаем, что перетоки по его высоте по своей величине намного меньше скоростей газа вдоль канала ($V_z=0$). Изменения остальных составляющих скоростей и давления по высоте жалюзийного элемента также не происходит, что позволяет исключить из приведенной выше системы дифференциальных уравнений треть, а из остальных уравнений системы – все слагаемые, содержащие осевую составляющую полной скорости газового потока. Также предполагаем, что в связи с малой шириной криволинейного канала величина давления по его ширине изменяется

незначительно, а основное изменение происходит вдоль. Получаем следующую систему дифференциальных уравнений в частных производных (для упрощения запись производим без указания зависимости от радиуса и окружной координаты):

$$V \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi \partial V_r}{r \partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r} = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V}{r^2} \right),$$

$$V \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_\varphi \partial V_\varphi}{r \partial \varphi} - \frac{V_r V_\varphi}{r} = -\frac{1}{\rho r} \frac{dP}{d\varphi} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right),$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_r}{r} = 0.$$
(2.8)

В первое и третье уравнения системы (2.1.8) входят только две составляющие скорости: радиальная и окружная составляющие скоростей газового потока. Составим систему из двух дифференциальных уравнений с двумя неизвестными, которая решается в аналитическом виде:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi \partial V_r}{r \partial \varphi} - \frac{V_\varphi^2}{r} = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V}{r^2} \right),$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_r}{r} = 0$$
(2.9)

Из всего многообразия возможных решений выбираем наиболее приемлемое, получающееся в области действительных чисел:

$$\begin{cases} V_r(r, \varphi) = \frac{r^2 C1 \sin(2\varphi) + r^2 C2 \cos(2\varphi) + C3}{r}, \\ V_f(r, \varphi) = \frac{1}{r} (-r^2 C2 \sin(2\varphi) + r^2 C1 \cos(2\varphi) + (r^4 C1^2 \cos(2\varphi)^2 + \\ + r^4 C1^2 \sin(2\varphi)^2 + r^4 C2^2 - C3^2)^{1/2}). \end{cases}$$
(2.10)

Константы интегрирования ($_C1$, $_C2$, $_C3$) будут определены в п. 4.2, учитывая опорные значения составляющих скорости, полученных в экспериментальных замерах.

В результате получаем выражения для каждой составляющей скорости газового потока в локальной системе координат, приведенных ниже:

$$V_r := \frac{1,862r^2 \sin(2\varphi) - 1,87r^2 \cos(2\varphi) + 2,766}{r}$$

$$V_f := 2213r^2 \cos(2\varphi) - 2181r^2 \sin(2\varphi) + \left(\frac{1}{r} (4897369r^4 \cos(2\varphi)^2 + 4897369r^4 \sin(2\varphi)^2 + 4756761r^4 - 9,7344)\right)^{1/2}. \quad (2.11)$$

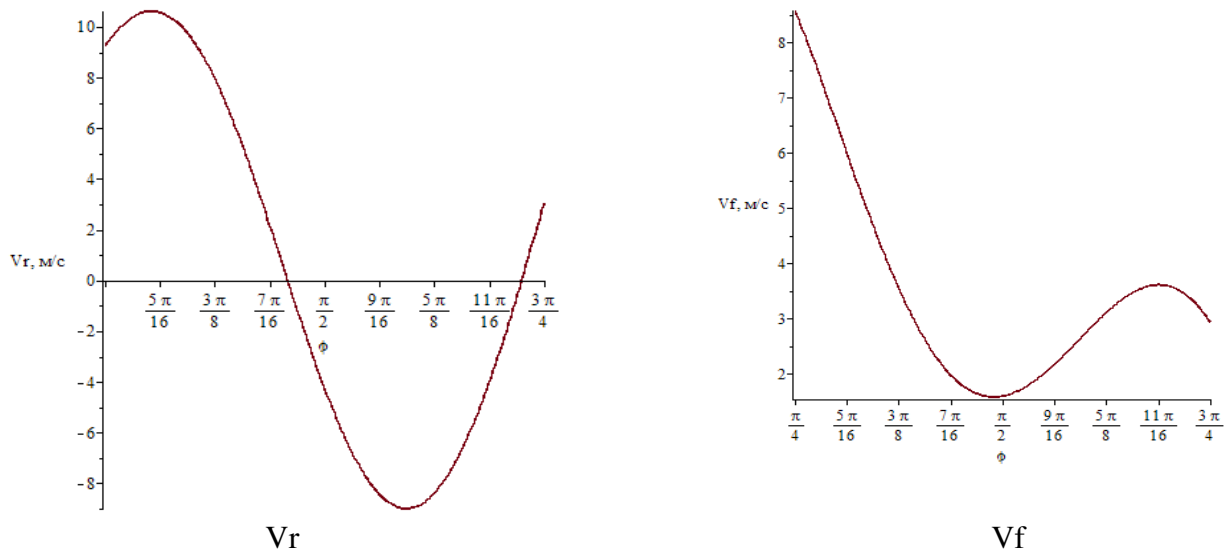


Рисунок 2.5.1– Результаты расчетов составляющих скорости по средним коэффициентам C в гофре 1

Графическая зависимость изменения скорости газа по радиусу и длине криволинейного канала показана на рисунке 2.6 для размеров криволинейного канала с радиусами $R_1=80$ мм, $R_2=180$ мм.

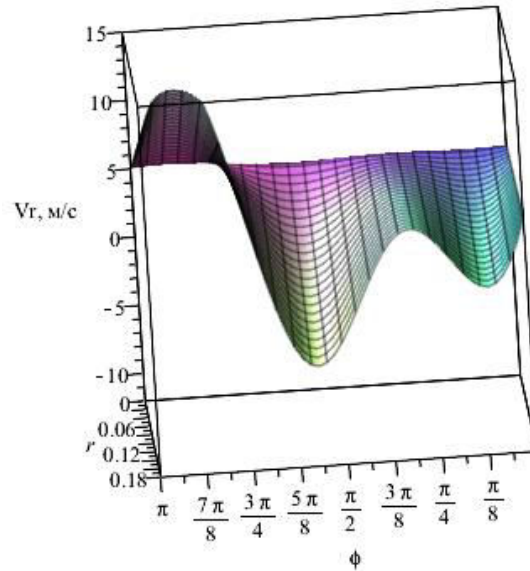


Рисунок 2.6 – Пример графического представления результатов расчета изменения радиальной составляющей скорости газового потока вдоль криволинейного канала с размерами $R_1=80\text{мм}$, $R_2=180\text{мм}$ при $\varphi_0=0$

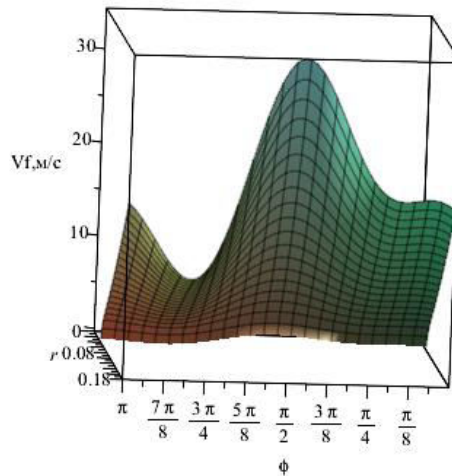


Рисунок 2.7 – Пример графического представления результатов расчета изменения тангенциальной составляющей скорости газового потока вдоль криволинейного канала с размерами $R_1=80\text{мм}$, $R_2=180\text{мм}$

И в результате построены графики зависимости скорости по сечению канала при $r=0,14$ м для гофры 1, при любом угле поворота потока.

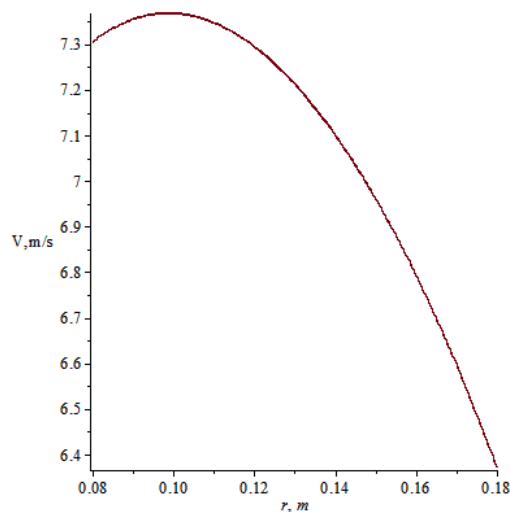
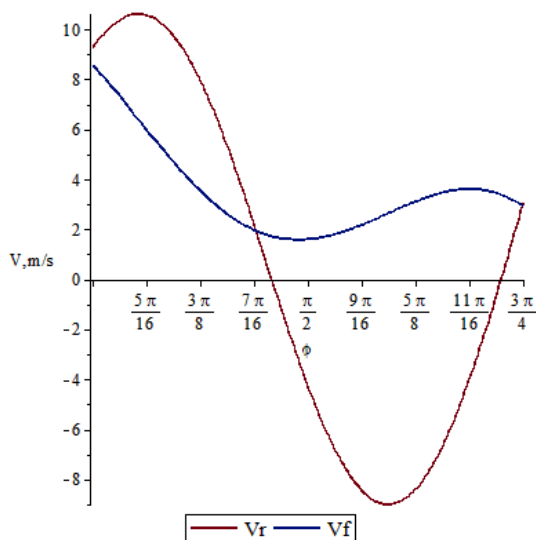


Рисунок 2.8 – Распределение скоростей V_r и V_f по сечению при $r=0,14$ м канала при расходе газа $0,328 \text{ м}^3/\text{с}$. Гофра №1

Рисунок 2.9 – Распределение абсолютной скорости V по сечению канала при $\phi=90^\circ$ при расходе газа $0,328 \text{ м}^3/\text{с}$. Гофра №1

В области внутренней стенки криволинейного канала (рисунок 2.9) (соответствует минимальному значению радиуса гофры) наблюдается максимальная скорость газового потока, а в области внешней стенки (соответствует максимальному значению радиуса гофры) – минимальная скорость. Учитывая выше приведенный факт, рекомендуем фильтрующий элемент расположить в области внешней стенки канала.

Рассмотрим алгоритм с зависимостью от гидродинамического критерия Рейнольдса как еще один возможный вариант нахождения составляющих скорости газа.

1. Записываем общую формулу для нахождения критерия Рейнольдса:
 $Re = Vd\rho/\mu$,

V – скорость газа, м/с, в нашем случае от $0 < V \leq 20$ м/с; d – эквивалентный диаметр канала, м, в нашем случае канал имеет размер $0,15 \times 0,1$ м и эквивалентный диаметр $0,03$ м; ρ – плотность газа, воздуха, $\rho = 1,205$ кг/м³; μ – вязкость воздуха при $t = 20^\circ\text{C}$, $\mu = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Для определения диапазона скоростей рассчитываем критерий Рейнольдса при разных расходах газа:

Таблица 2.1

Результаты расчета полной скорости газа

Qб, м ³ /с	S, м ²	Re	v
0	0,015	0	0
0,015	0,015	15480	1
0,03	0,015	30960	2
0,075	0,015	77400	5
0,106	0,015	123840	7
0,1578	0,015	162840	10,52
0,18	0,015	185760	12
0,21	0,015	216720	14
0,24	0,015	247680	16
0,27	0,015	278640	18
0,285	0,015	294120	19
0,3	0,015	309600	20

Зная формулу для расчета критерия Рейнольдса, выводим расчетную зависимость для наших условий: $Re = 15480Q/S$.

Далее для нахождения констант интегрирования нужно провести аэродинамическое зондирование потока, описанное в разделе 4.2.

Учитывая изложенную методику, строим графические зависимости для тангенциальной и радиальной составляющих скорости.

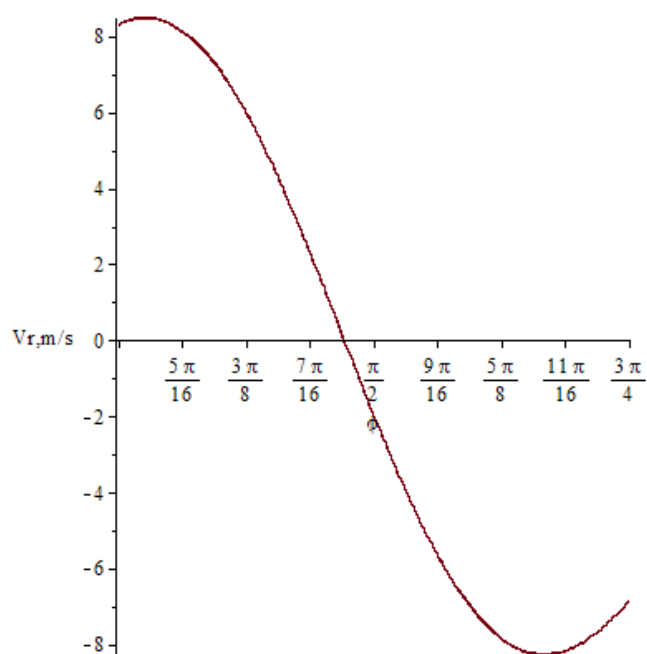


Рисунок 2.10 а – График изменения составляющей скорости V_r при $r = 0,14\text{м}$, $Re = 123840$

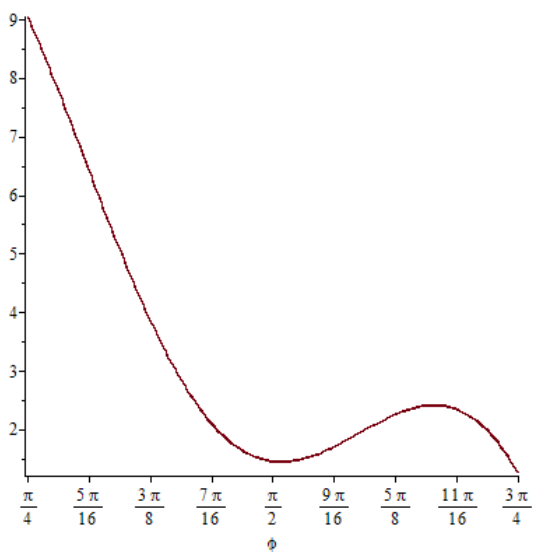


Рисунок 2.10 б – График изменения составляющей скорости V_t при $r=0,14$ м, $Re=123840$

Изменения скорости в других гофрах представлены в приложении Л.

Вышеизложенное показывает методику расчета скорости газа в зависимости от критерия Рейнольдса в диапазоне от 1 до 3096000 (табл. 2.3) и дает возможность вести расчеты при изменении свойств среды (плотность, вязкость).

Если провести преобразование формул из цилиндрической декартову систему координат, получим такие выражения при угле раскрытия гофр 90 град.:
 $R1=80$ мм, $R2=180$ мм.

В глобальной системе координат выражения:

$$\begin{aligned}
 V_f := & 2213(x^2 + y^2) \cos\left(2 \arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) - 2181(x^2 + y^2) \sin\left(2 \arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} \times \right. \\
 & \times (4897369(x^2 + y^2)^2 \cos(2 \arctan\left(\frac{y}{x}\right))^2 + (4897369(x^2 + y^2)^2 \sin(2 \arctan\left(\frac{y}{x}\right))^2 + \\
 & \left. + 4756761(x^2 + y^2)^2 - 9.7344)\right)^{1/2}, \\
 V_r := & \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}}(-1,862(x^2 + y^2) \sin(2 \arctan\left(\frac{y}{x}\right)) + 1,87(x^2 + y^2) \cos(2 \arctan\left(\frac{y}{x}\right)) - \\
 & - 2,7661.87(x^2 y^2) \sin\left(1,333333333 \arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right) 1,87(x^2 + y^2) \cos\left(3,714285714 \arctan\left(\frac{y}{x}\right)\right)).
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

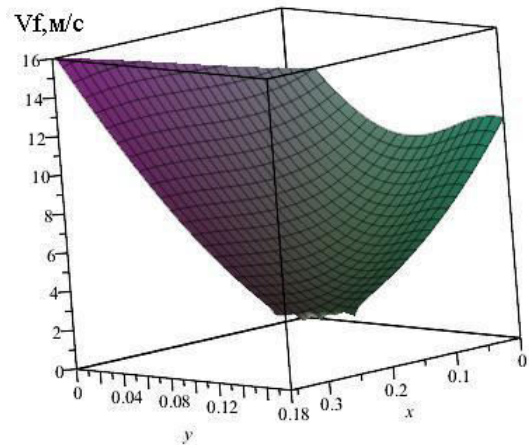
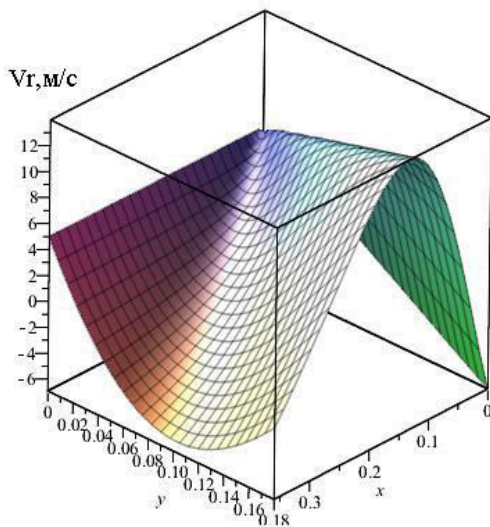


Рисунок 2.10 в – Трехмерные графики распределения скоростей

2.1.3. Роль и эффективность работы сепарационных элементов в рабочей полости инерционно-фильтрующих сепараторов

В инерционно-фильтрующих сепараторах используются конструкции сепарационных устройств, служащие для улавливания мельчайших капель жидкости, уносимых потоком газа. Каплеуловительная секция конструктивно может быть различной, и ее работа основывается на одном или нескольких принципах, например:

- столкновении потока газа с различного рода препятствиями: прилипание капель жидкости, силы адгезии;
- изменении направления потока: силы инерции;
- изменении скорости потока;
- использовании центробежной силы;
- использовании коалесцирующей набивки (металлические сетки) для слияния мелких капель жидкости в более крупные.

Эффективность большинства жалюзийных инерционно-фильтрующих сепараторов напрямую зависит от их аэродинамического сопротивления: чем больше ловушек или препятствий, тем эффективнее процесс разделения и тем выше сопротивление аппарата. Использование дополнительных конструктивных особенностей, создающих обратные потоки завихрений при непосредственном контакте газок капельного потока и капель жидкости, приводит к разрушению структуры пленки и брызгоуносу, интенсивность которого определяется скоростью газового потока.

Следует отметить, что указанные выше дополнительные элементы также создают дополнительное гидравлическое сопротивление, что приводит к повышению общего гидравлического сопротивления и невозможности достижения высокой степени очистки, снижению удельной продуктивности газосепаратора[6].

2.1.4. Влияние отводов жидкости на эффективность работы инерционно-фильтрующего сепаратора

При работе инерционно-фильтрующих сепарационных элементов одним из основных факторов, влияющих на эффективность разделения, является вторичный брызгоунос. Величина его зависит от эффективной работы фильтрующего элемента и скорости отвода уловленной жидкости [61]. В данной главе рассматривается исследование модели накопления и отвода жидкости из фильтрующих элементов различной формы при схеме движения, показанной на рисунке 2.11.

Зная форму и размеры фильтрующего элемента, можно рассчитать, какое количество жидкости данный элемент может в себя вместить. Емкость фильтра выразим через объем жидкости, которую может поглотить фильтр [62]. Таким образом, чем больше объем жидкости, который вмещает в себя фильтрующий элемент, тем брызгоунос меньше.

При расчете скорости движения, важное значение имеет структура материала.

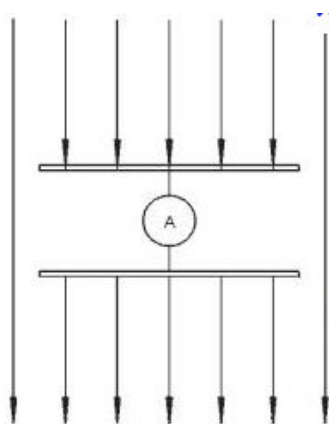


Рисунок 2.11– Схема движения жидкости в инерционно-фильтрующем элементе, в фильтре вдоль вертикальной оси [31]

Так как в основном в промышленности используются фильтры в виде полос, то при больших расходах жидкости могут возникать на определенной высоте критическое накопление и выход уловленной влаги в инерционный канал из-за того, что все поры в фильтре заняты уловленной жидкостью.

На жидкость в фильтре действует сила тяжести

$$F=mg. \quad (2.13)$$

В процессе движения жидкость может перемещаться к стенке фильтра и контактировать с газом при недостаточной скорости отведения уловленной жидкости. Таким образом, для предотвращения срыва пленки рекомендовано делать фильтры трапецеидальной формы [63].

В вертикальных газосепараторах вертикальный отвод жидкости происходит в виде пленки. Следует отметить, что вторичный унос жидкости в них происходит при больших скоростях газокапельного потока [64]. Коэффициент эффективности жалюзийного инерционно-фильтрующего туманоуловителя [48] может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2(1 - \eta_1), \quad (2.14)$$

где η_1, η_2 - коэффициенты эффективности инерционной и фильтрующей секций соответственно.

В результате рассмотрения всех факторов можно сделать вывод о том, что правильное проектирование узла отвода жидкости приводит к снижению брызгоуноса и повышает эффективность работы инерционно-фильтрующего сепаратора.

Объемный расход жидкости, который проходит через фильтр

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (2.15)$$

где V – объем жидкости, м^3 ; t – время, с.

Скорость фильтрации:

$$u = \frac{Q}{S}, \quad (2.16)$$

где S – площадь поперечного сечения, м^2 .

В нашем случае фильтрующий элемент имеет поперечное сечение в виде сегмента, и его поперечное сечение определяется по формуле для нахождения площади сегмента, так как фильтр имеет сегментарную форму (рисунок 2.12):

$$s_{\phi} = \frac{R_{\phi}^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \phi}{180} \sin \phi \right).$$

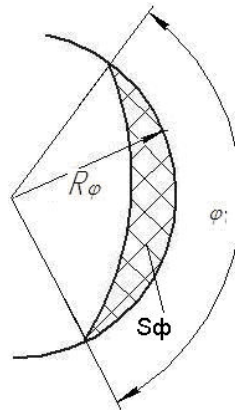


Рисунок 2.12 – Расчетная схема фильтрующего элемента

Для определения минимального радиуса гофры, при котором будет происходить улавливание капель заданного диаметра, применим формулу, исходя из баланса сил, действующих на каплю. Она указана для определения минимального диаметра улавливаемых капель при известной геометрии канала [4]:

$$r_{min} = 3 \left(\frac{V_1 W_k P_k}{2 \cdot g P_{ж}} \right)^{0,5} \frac{gh}{W_k^2} \frac{R_{min}^2}{L} \frac{S_{ж}}{S_c} \sin (\phi/2). \quad (2.17)$$

Исходя из того, что мы знаем минимальный расчетный диаметр капель, которые нужно уловить в нашем сепараторе, можно найти минимальный радиус гофры, позволившей это сделать:

$$R_1 = R_{\kappa\rho} = \frac{2 \cdot R_{min}^2 \cdot P_{ж} \cdot W_{\kappa}^2 \cdot L \cdot S_c}{9 \cdot h \cdot S_{ж} \cdot \sin(\varphi/2) \cdot V_r \cdot W_{\kappa} \cdot P_{\kappa}} - r_{min}^2. \quad (2.18)$$

Примем допущение, что скорость фильтрации жидкости в теле фильтра невелика и поэтому скоростным напором можно пренебречь, тогда рассматриваем течение газа и жидкости в теле фильтра согласно закону Дарси и Бернулли.

Согласно [65] и учитывая то, что движение жидкости происходит под действием силы тяжести и вдоль вертикальной оси z ,

$$u_z = -\frac{\kappa_z}{m} \frac{\partial p^*}{\partial z}. \quad (2.19)$$

Зная скорость движения и количество жидкости, которое поступает в фильтр,

можно высчитать высоту захлебывания фильтра и место установки лотков.

Для этого нужно знать влагоемкость фильтра

$$V = m \cdot V_{\phi}, \quad (2.20)$$

где m – объем жидкости, которую может поглотить фильтр;

V_{ϕ} – объем фильтра, м^3 .

Для проведения расчетов примем такие допущения.

1. В самой высокой точке фильтра количество жидкости равно нулю.
2. По всей высоте фильтра в него поступает одинаковое количество жидкости.

Пока выполняется условие:

$$V = V_{ж} \cdot h \quad (2.21)$$

где $V_{ж}$ – количество жидкости, которое поступает на единице высоты в фильтр, м^3 ; h – высота фильтра уже наверху, м.

Учитывая, что на определенной высоте наступает режим захлебывания фильтра и он начинает работать как непроницаемая стенка, весь жидкостный поток, идущий в составе газожидкостной смеси, не отделяется от него, и соответственно эффективность работы уменьшается. Для уменьшения влияния нужно предусмотреть лотки для отвода на минимальной высоте при максимальной нагрузке по жидкости.

И эта максимальная нагрузка должна быть указана в характеристике сепаратора. При рассмотрении работы в экстремальном режиме нужно предусматривать противовыбросовые устройства.

Далее свяжем высоту канала и наличие в нем лотков, а также эффективность работы устройства.

Допустим, что высота всего фильтрующего элемента равна H , величина, на которой должен быть установлен лоток, – h_1 .

Тогда, если лотка нет, неэффективная высота фильтрующей полосы, на которой будет происходить выход уловленной жидкости обратно в канал, равна

$$h_{нэ} = H - h_1. \quad (2.22)$$

Предположим, эффективность работы всего сепаратора при том, что нет захлебывания, равна 100%, тогда при выходе на высоту h_1 эффективность будет

$$\eta = \left(1 - \frac{H - h}{H}\right) \cdot 100 \%. \quad (2.23)$$

После проникновения газочапельного потока в фильтрующие секции улавливание капель жидкости сопровождается сложными вторичными процессами в пласте фильтра, в результате чего его структура существенно меняется [66]. Уловленные волокнами капли растекаются по их поверхности с

образованием пленки, толщина которой увеличивается, становится неустойчивой и разрушается на отдельные капли.

В газокапельном потоке (конденсационный туман) между волокнами дисперсные частицы (капли) летят по линиям тока, огибающим волокна, отмечая влияния сил инерции и броуновской диффузии, что является причиной сбивания их из линий тока и может привести к улавливанию волокнами (показано на рисунке 2.13 а). При этом возможны следующие механизмы осаждения капель на волокнах. Эффект прикосновения (зацепление) происходит, когда линии тока газового потока, с которым двигаются капли, проходят над поверхностью препятствия (волокна) на расстоянии, равном радиусу капли или ближе. Инерционное столкновение происходит тогда, когда масса капли или скорость ее движения настолько значительные, что она не может полностью двигаться вместе с газовым потоком по его линиям тока, резко огибающим препятствия. Поэтому капли, подчиняясь инерции, продолжают свое движение по более прямолинейным траекториям и сходят с линий тока. Броуновское движение высокодисперсных частиц (капель) – результат столкновения газовых молекул с поверхностью капель подобно массообмену за счет молекулярной диффузии.

Кроме того, основной процесс сепарации [67] может активно сопровождаться вторичными процессами с выходом на режимы нестационарной фильтрации. Под вторичными процессами понимаются явления, вызывающие изменение значения эффективности сепарации и сопротивления со временем. Вследствие сложности и многосторонности вторичных процессов стадия нестационарной фильтрации изучена недостаточно.

Фильтрующие элементы в инерционно-фильтрующем газосепарационном элементе, закрепленные на жалюзийных элементах вертикально, представляют собой полосы волокнистого полипропилена. При создании физической модели сепарационного канала с фильтрующими секциями инерционно-фильтрующего

газосепаратора было применено иглопробивное полотно из синтетических полипропиленовых волокон. Это обусловлено тем, что полипропиленовые материалы, известные своей универсальной химической стойкостью, также хорошо смачиваются (так как полипропилен гидрофобен, имеет низкую стоимость) и соответственно эффективно улавливают углеводородные капли заданного диаметра, отводя их с конденсационного тумана [56]. При движении газокapельного потока по жалюзийным элементам происходит улавливание фильтрующими полосами диспергированной жидкости.

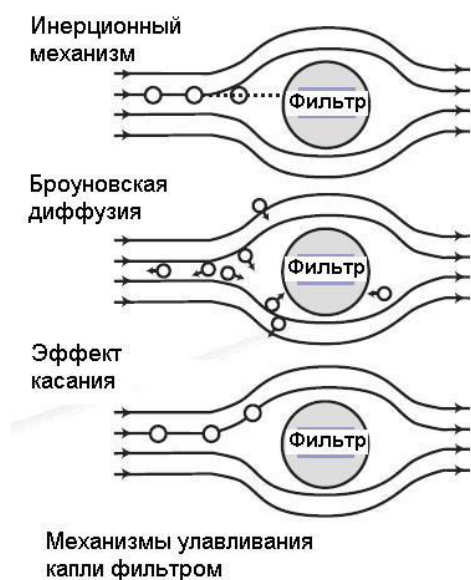


Рисунок 2.13 а – Механизмы улавливания капли фильтром

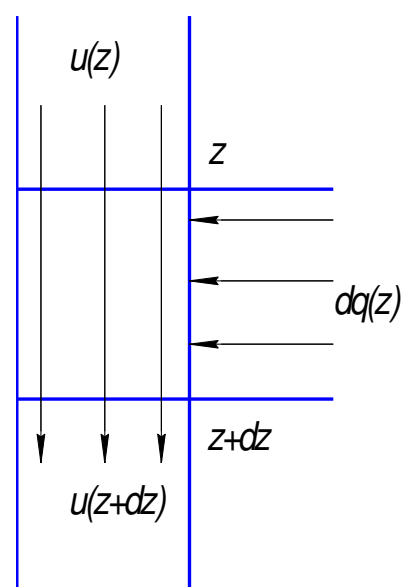


Рисунок 2.13б – Картина отвода уловленной жидкости по фильтрующим элементам

Для математического моделирования рассмотрим участок фильтра высотой dz .

Согласно общеизвестным понятиям гидростатики давление на отметке z будет следующее:

$$P = P_{\text{дин}} + \rho g z, \quad (2.24)$$

где $P_{\text{дин}}$ – давление на верхней отметке фильтрующего элемента, Па;

$\rho g z$ – давление столба жидкости высотой z , Па.

Основные методы расчетов [63] не учитывают добавления жидкости к фильтрующему элементу по бокам фильтра, поэтому при наших расчетах необходимо учитывать постоянное поступление жидкости с фильтрующего элемента. Постепенное накопление уловленной жидкости приведет к его критическому объему в фильтре. Высота, на которой будет происходить критическое накопление, покажет, где именно необходимо устанавливать элементы отвода жидкости в дренирующий канал и начинать новую полосу фильтра.

Так как давление на верхней отметке фильтра неизменное, то можно считать, что изменение давления по высоте фильтра будет лишь функцией скорости фильтрации [69]:

$$\frac{dP}{dZ} = -f(u). \quad (2.25)$$

Принимая во внимание геометрическую форму фильтра, целесообразно вести расчеты в цилиндрической системе координат. Берем формулу Гашена-Пуазейля для определения течения вязкой жидкости по телу фильтра [63]:

$$f(u) = \frac{8\mu u}{r_\phi^2}, \quad (2.26)$$

де μ – динамический коэф. вязкости, Па·с;

r_ϕ – радиус элементарной трубки фильтра, м.

Для определения количества жидкости, которая поступила к фильтру на высоте dz , можем использовать известную формулу Дюпюи [80]:

$$dq(z) = \frac{2\pi\kappa_1 (P_3 - P(z))dz}{\mu \ln \frac{R}{r_\phi}}, \quad (2.27)$$

где P_3 – внешнее давление на фильтрующий элемент, Па;
 R – радиус зоны накопления жидкости, м.

Поток жидкости, поступающий из отметки z , будет:

$$dq = \pi r_\phi^2 u(z). \quad (2.28)$$

Таким образом, скорость движения жидкости на отметке $z+dz$ будет равна

$$u(z+dz) = \frac{\pi r_\phi^2 u(z)}{\pi r_\phi^2} = u(z) + \frac{2\kappa_1 (P_3 - P(z))dz}{\mu r_\phi^2 1n\left(\frac{R}{r_\phi}\right)}. \quad (2.29)$$

Таким образом, по формуле (5) мы имеем возможность прогнозировать скорость жидкости на любой высоте фильтрующего элемента.

С другой стороны, при движении жидкости по фильтру должно выполняться уравнение(2):

$$\frac{dP(z + dz)}{dz} = -f(u(z + dz)). \quad (2.30)$$

Тогда, учитывая предыдущее значение, изменение на участке dz будет:

$$\frac{dP(z + dz)}{dz} - \frac{dP(z)}{dz} = -f(u(z)) - f(u(z + dz)), \quad (2.31)$$

$$\frac{d^2 P(z)}{dz^2} = -\frac{2\kappa_1 (P_3 - P(z))dz}{\mu r_\phi^2 1n\left(\frac{R}{r_\phi}\right)} f(u(z)). \quad (2.32)$$

В уравнении(9)неизвестны две функции – $P(z)$ и $u(z)$.

Согласно 5можно найти $u(z)$, при применении теоремы Лагранжа[70,71] и значения $dz=0$:

$$u(z) = \frac{dg}{\pi r_{\phi}^2} \frac{2\kappa_1 (P_3 - P(z)) dz}{r_{\phi}^2 \mu n \left(\frac{R}{r_{\phi}}\right)} = \frac{2\kappa_1}{r_{\phi}^2 \mu n \left(\frac{R}{r_{\phi}}\right)} \int_0^z (P_3 - P(z)) dz. \quad (2.33)$$

Зная краевые условия и значения для функции $u(z)$, можно найти количество жидкости, поступающей к фильтрующему элементу на всей его высоте. Это даст возможность спроектировать размеры фильтра, который будет справляться с улавливанием и отводом жидкости из инерционно-фильтрующих элементов.

Для достижения высокой эффективности процессов сепарации необходимо создание высокоинтенсивных гидродинамических режимов движения потоков в газосепарационных устройствах [50]. Экспериментальными исследованиями созданной физической модели сепарационного канала с фильтрующими секциями инерционно-фильтрующего газосепаратора (в режимах $2300 \leq Re \leq 100000$) подтверждено, что в переходном режиме газовый поток вязко неотрывно обтекает, огибая выступы и впадины, практически точно повторяя геометрическую конфигурацию криволинейного сепарационного канала. Максимальное значение скорости характерно для ядра газового потока. Пограничные (ламинарные) пласты вблизи стенок канала, особенно в местах впадин, характеризуются минимальными скоростями движения газа, в некоторых даже достоверным возникновением обратных токов и вихревых течений. При развитом турбулентном течении потока ($Re \geq 10000$) выявлено увеличение более чем в два раза локальных скоростей газового потока близ выступов криволинейных участков стенок канала (при $\phi = 70^\circ$), что являются зонами потенциального диспергирования пленки уловленной жидкости и вторичного

брызгоуноса [56]. В результате анализа распределения локальных скоростей движения газового потока по криволинейному сепарационному каналу четко определены геометрические зоны целесообразного расположения фильтрующих элементов в местах впадин сепарационного канала вплотную к стенкам жалюзи, где локальные скорости достигают минимальных, и с другой стороны, ограниченные линиями равных скоростей $|v|=\text{const}$ (изотаксами) со значениями скорости, равняющимися скорости газового потока на входе в криволинейный канал и значениям угла $\varphi=60-110^\circ$.

Полученные результаты исследований поля скоростей и давлений подтолкнули к созданию нового способа сепарации высокодисперсной капельной жидкости из газожидкостного потока и созданию модели высокоэффективного инерционно-фильтрующего сепаратора с низким гидравлическим сопротивлением [56]. Скоростного напора в надветренной зоне выступления сепарационного канала оказывается достаточно для создания перепада давления (движущей силы) по обе стороны двойной жалюзи со стороны разных каналов для продвижения сквозь пористые жалюзи и нетолстый пласт фильтрующего материала между каналами. Кроме того, на этом участке двойной жалюзи со стороны другого канала находится именно зона пониженного давления (застойная зона), или зона вихреобразований, в зависимости от интенсивности гидродинамического режима движения сплошной несущей фазы по сепарационным каналам.

При достижении дисперсной частицей поверхности, ограничивающей криволинейный сепарационный канал, капля попадает в фильтр, как показано на рисунке 2.14.

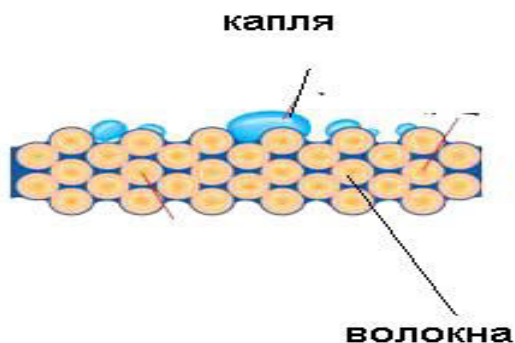


Рисунок 2.14 – Схема захвата капли фильтром

2.2. Влияние свойств газок капельной среды на эффективность сепаратора

Для рассмотрения влияния радиуса капель на эффективность разделения газожидкостной смеси рассмотрим расчет скорости уноса капель. Если скорость движения газожидкостной системы больше, чем критическая скорость уноса, то эти капли будут унесены из сепарационного канала.

Для ее расчета необходимо следующее:

1. Находим критерий Архимеда [72]:

$$Ar = \frac{d_k \cdot g \cdot P_c (P_k - P_c)}{\mu_c^2}. \quad (2.34)$$

Если рассматривать газожидкостную систему как набор капель в газе, то в выделенном объеме, можно ввести понятие порозности. Тогда при скорости уноса порозность будет равен 1, так как все капли будут унесены из выделенного объема потоком дальше. Тогда критерий Рейнольдса [72]:

$$Re = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{0,75}}} \quad (2.35)$$

Зная критерий Рейнольдса, находим скорость уноса:

$$Re_{кр} = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu} \rightarrow w = \frac{Re_{кр} \cdot \mu}{d\rho}. \quad (2.36)$$

Если скорость движения газа больше, чем скорость витания, то все капли, находящиеся в потоке, уносятся и эффективность разделения газожидкостной смеси падает за счет брызгоуноса. Поэтому необходимо увеличивать размер капель и стимулировать коагуляцию, что будет способствовать процессу осаждения капель.

Для оценки эффективности разделения газожидкостной смеси в сепараторе нужно рассчитать критический радиус капель, при котором происходит ее разрушение. В процессе движения по прямолинейному участку необходимо, чтобы коагуляция происходила, но к моменту подхода к криволинейному участку и попаданию ее в фильтр она не разрушилась.

При равновесии капли силы поверхностного натяжения должны быть больше, чем силы аэродинамического сопротивления, только тогда капля не будет дробиться [1].

Лимитирующим фактором при разделении жидкости и газа является скорость отвода жидкости из фильтра.

Плотность газа прямо пропорционально влияет на силу аэродинамического сопротивления и с ее увеличением количество энергии, которое необходимо приложить к капле для выхода ее из потока, увеличивается. Таким образом, при увеличении давления в аппарате увеличивается плотность газа и может уменьшаться эффективность разделения газа и жидкости.

Плотность жидкости связана с ее массой, а масса прямо пропорционально влияет на центробежную силу. Можно сделать вывод, что при увеличении плотности возрастают масса и, как следствие, – центробежная сила, что и повышает эффективность работы сепаратора.

2.3. Влияние конструктивных особенностей инерционно-фильтрующего сепаратора на движение потоков и его сепарационные характеристики

К конструктивным особенностям инерционно-фильтрующих сепараторов следует отнести такие характеристики: длину прямолинейного участка, радиус кривизны гофр, расстояние между жалюзи и угол раскрытия гофр.

Предположим, что в гофру газ заходит нормально, и потом происходит перераспределение скорости, как показано на рисунке 2.15.

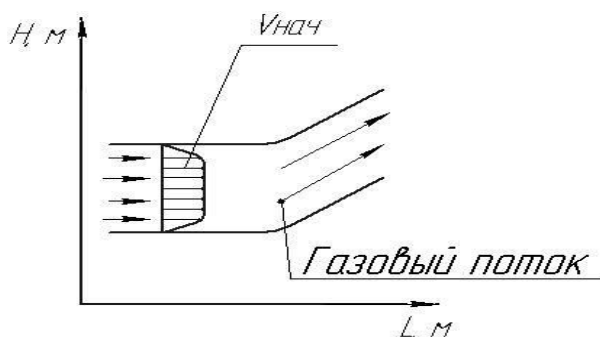


Рисунок 2.15 — Схема начального распределения скорости газа в канале инерционно-фильтрующего сепаратора

Для того, чтобы получить равномерное распределение скорости, необходимо иметь длину прямолинейного участка размером [73]:

$$l_{\text{нач}} = 3 \cdot d_э, \quad (2.37)$$

где $d_э$ — эквивалентный диаметр канала, м,

$$d_3 = 4S/\Pi \quad (2.38)$$

где S – площадь поперечного сечения канала, м^2 ;

Π – смоченный периметр канала, м .

После прохождения начального участка жалюзи начинается перераспределение скорости, как показано на рисунке 2.16 [56].

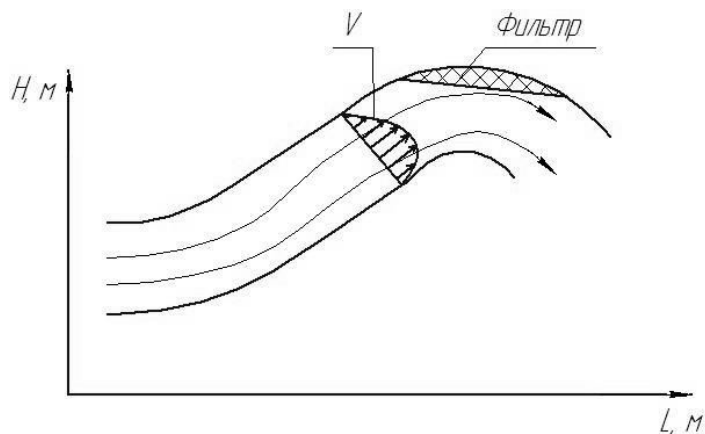


Рисунок 2.16 – Распределение локальных скоростей и траектория движения газового потока перед фильтрующим элементом

Вышеприведенный рисунок иллюстрирует выраженный экстремум скорости потока, насыщенного влагой. При наличии такого профиля скоростей происходит разгон капель до скоростей, необходимых для их отклонения от линий тока газа и попадания в фильтрующий элемент.

После прохождения криволинейного участка необходимо осуществить перераспределение скоростей газового потока и разогнать капли для их отделения в следующем фильтрующем элементе. В общем случае на гофре скорость имеет профиль [56], показанный на рисунке 2.17.

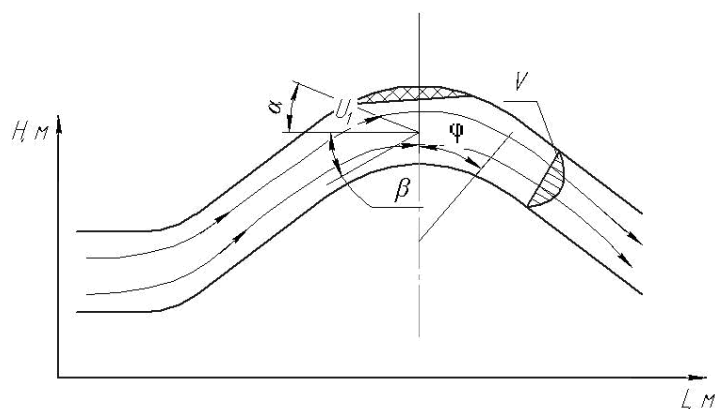


Рисунок 2.17–Распределение скорости после фильтра [56]:

β – угол набегания потока на фильтр, град; α – угол поворота потока, град;
 φ – угол раскрытия гофр

Теперь рассмотрим влияние каждого из гидродинамических факторов на профиль скорости.

Радиус поворота связан с путем, который газ проходит в полукольце, так

$$L = 2 \cdot \pi \cdot R_{cp}, \quad (2.39)$$

где R_{cp} – средний радиус траектории движения скорости капли.

При уменьшении радиуса до критического значения происходят интенсивное образование зон вихрей [56] и, как следствие, снижение давления, что отрицательно влияет на устойчивость потока.

Также в зоне установки фильтрующих элементов необходимо иметь зоны сниженных скоростей для уменьшения брызгоуноса, что обеспечивается несколькими способами:

- наличием расширения при повороте канала;
- установкой фильтра во впадине.

Такое профилирование канала подразумевает наличие зон торможения и разгона. Под зоной разгона потока понимают прямолинейный участок, а под зоной торможения – криволинейный участок [55].

Рассмотрим, насколько может быть ускорен или заторможен поток. Классическое уравнение неразрывности потока имеет вид [72]:

$$V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2. \quad (2.40)$$

Для того чтобы уменьшить скорость, нужно увеличить проходное сечение прямопропорционально, но в рассматриваемом случае нет необходимости тормозить весь поток, поэтому можно этого добиться за счет увеличения угла раскрытия гофры уменьшения угла атаки.

Теперь рассмотрим влияние угла раскрытия. При малом угле раскрытия (до 60°) образуется острый угол, это приводит к тому, что зона обратного течения потока получается длинной и, для того чтобы поток выравнился, необходимо увеличивать прямолинейный участок, что приведет к уменьшению эффективности.

Для прямопропорциональной связи траектории необходимо знать время, необходимое для перераспределения потока.

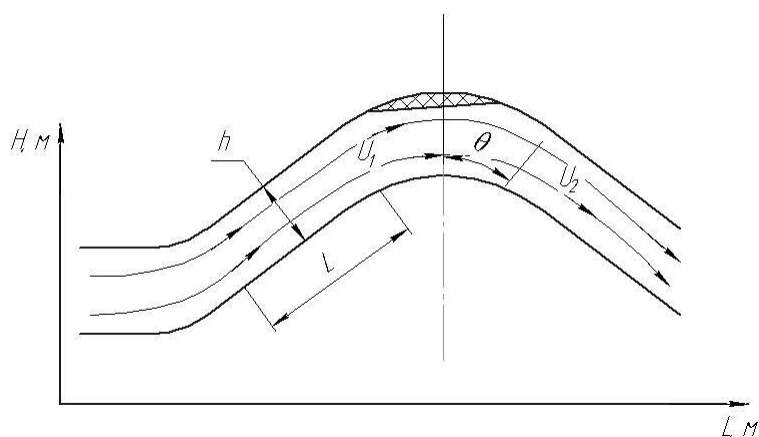


Рисунок 2.18 – Геометрические параметры течения газа на криволинейном участке:

h – расстояние между жалюзи, м; L – длина прямолинейного участка, м; U_1 , U_2 – средние скорости потока до и после криволинейного участка, м/с

Угол раскрытия и радиус, возможно, имеют влияние на время и расстояние, на котором происходит перераспределение скорости.

Для расчета эффективной ширины потока после поворота [72]:

$$\frac{u_1}{u_2} \cdot \sin a_1 = \frac{\sin a_1 \sin \beta}{\sin a_1 + \sin(a_1 + \beta)}. \quad (2.41)$$

Угол α зависит от профиля скорости после фильтра.

Теперь рассмотрим влияние расстояния между жалюзями на процесс сепарации. Важный фактор при проведении процесса сепарации – длина пути капли до входа ее в фильтрующий элемент. Для этого необходимо рассчитать длину и время прохождения

$$S = V \cdot \tau. \quad (2.42)$$

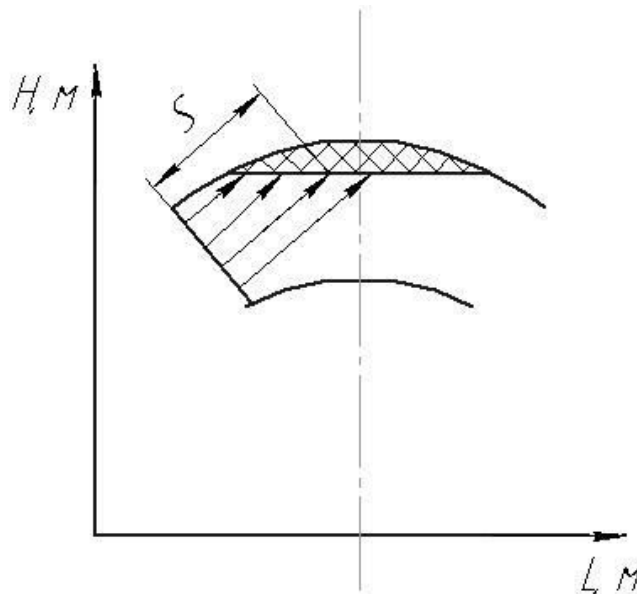


Рисунок 2.19 – Траектории движения капелек фильтру, которые считаются по формуле (2.3.6)

2.4. Математическое описание влияния гидродинамики газокapelного потока в рабочей полости инерционно-фильтрующего сепаратора на эффективность его работы

При описании движения капelь в газовом потоке разница между плотностями сплошной и дисперсной фаз достигает приблизительно 1000 кг/м^3 , поэтому массовые силы, действующие на каплю, значительно искривляют траекторию ее движения.

На нее действуют такие силы: трения, инерции, массовые. Также значительное влияние имеет форма капelи, учитываемая коэффициентом лобового сопротивления ψ .

В зависимости от условий движения капля может измельчаться и укрупняться (коагулировать). Ее масса влияет на величину силы инерции, а также на угол отклонения от траектории движения газового потока.

При движении многофазных потоков (в нашем случае двухфазного) в сравнении с однофазным описанием движения каждой фазы осложнено. Это должно быть отображено в математическом описании движения, но с некоторыми упрощениями:

- концентрация капelь достаточно мала, поэтому их влиянием возле фильтра на скорость газа можно пренебречь;
- капelи не взаимодействуют между собой во время движения (то есть не происходит коалесценции и измельчения капelь);
- плотность газа и капelь постоянная;
- капelи имеют сферическую форму;
- поток есть плоским, то есть перетоки между пластами по оси z почти равняются нулю;
- смесь является монодисперсной.

В общем виде сила инерции капли находится по формуле

$$F_{ц} = m_k \cdot \omega^2 / r. \quad (2.43)$$

На каплю действуют сила аэродинамического сопротивления, сила инерции капли.

Рассматривая систему дифференциальных уравнений движения капель диаметром δ в полярных координатах, имеем вид [53]:

$$mj_r = F_r; mj_\varphi = F_\varphi, \quad (2.44)$$

где j_r, j_φ – проекции вектора ускорения капли на радиус вектора и нормаль к нему; F_r, F_φ – проекции силы сопротивления F .

Учитывая направление капли как сложное движение точки, получим:

$$\vec{j} = \vec{j}_{от} + \vec{j}_{PER} + \vec{j}_{KOR}, \quad (2.45)$$

где $\vec{j}_{от}$ – относительное ускорение; \vec{j}_{PER} – переносное ускорение; \vec{j}_{KOR} – кориолисово ускорение.

Находим далее эти ускорения:

$$j_r = j_{от} + j_{TC} = dW_r/d\tau - r\omega_2^2 = dW_r/d\tau - W_\varphi^2/r, \quad (2.46)$$

$$j_\varphi = j_{кас} + j_{KOR} = r dW_r/d\tau + 2\omega_2 W_r = dW_\varphi/d\tau - W_r W_\varphi/r, \quad (2.47)$$

где j_{TC} – центростремительное ускорение, и $j_{кас}$ – касательное ускорение.

Также находим адаптированные формулы для определения сил, действующих на каплю, учитывая формулы (2.39 и 2.40):

$$F_r = F \cos \gamma = F u_r / u = \psi \pi \mu_r d_k u_r / 8, \quad (2.48)$$

$$F_\varphi = F \sin \gamma = F u_\varphi / u = \psi \pi \mu_r d_k u_\varphi / 8. \quad (2.49)$$

В выражения входят составляющие относительно скорости капли:

$$u_r = V_r - W_r, u_\varphi = V_\varphi - W_\varphi.$$

В результате получаем систему дифференциальных уравнений, по которым можем найти скорости капли. Подставим формулы (2.46), (2.47) и (2.48), (2.49) в уравнения (2.44), получим

$$\begin{cases} \frac{dW_r}{dt} = \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \frac{\pi \mu_r d_k}{8m} (V_r - W_r), \\ \frac{dW_\varphi}{dt} = -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \frac{\pi \mu_r d_k}{8m} (V_\varphi - W_\varphi). \end{cases}$$

$$\frac{dt}{dr} = W_r; \quad \frac{rd\varphi}{dt} = W_\varphi;$$

$$W - dt = dr/W_r, dt = rd\varphi/W_\varphi. \quad (2.50)$$

В данной диссертационной работе рассмотрено два варианта решения нахождения скоростей капель в канале.

Вариант 1. Аналитическое решение

При аналитическом решении уравнений движения капель сферической формы на основании второго закона Ньютона и при допущении того, что тангенциальная скорость капель и газа отличается немного, выражение для тангенциальной составляющей скорости капель можно принять такое же, как и для газа ($W_\varphi \approx V_\varphi$). В результате решения дифференциальных уравнений получаем выражения, показывающие зависимость скорости капель от локальных координат (r, φ), что позволит рассчитать скорость капель в канале полукольца.

Согласно нашему предположению о том, что тангенциальная составляющая скорости газа равна тангенциальной составляющей скорости капель ($W_\varphi \approx V_\varphi$), берем выражение для первой гофры:

$$Wf(\varphi) := -\frac{238}{3}r^2\cos(2\varphi) + \frac{299}{6}r^2\sin(2\varphi) + \frac{299}{6}r^2\cos(4\varphi) + \frac{1}{6}\sqrt{\frac{226576r^4\cos(2\varphi)^2 + 226576r^4\sin(2\varphi)^2 + 89401r^4 - 0.9025}{r}}. \quad (2.51)$$

Далее пытаемся решать систему и не получаем в результате выражение для Wr .

Согласно [74], в качестве характерной скорости внутри канала принимаем среднюю скорость потока $V_{ср}$, далее приводим результаты расчетов на среднем радиусе. Зная уравнение, строим трехмерный график при $r=0,14$ м для составляющей скорости Wf .

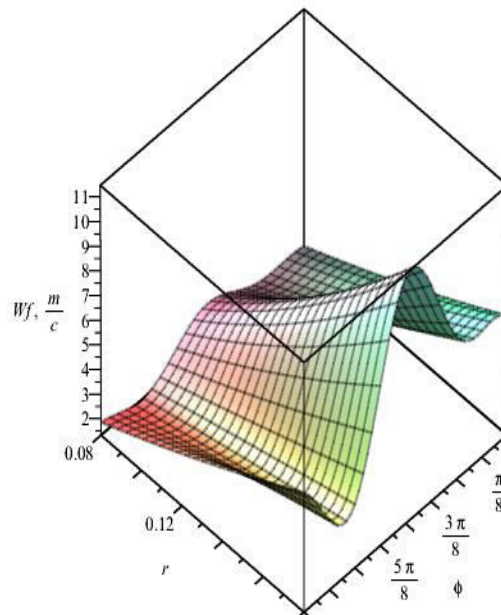


Рисунок 2.20 – График распределения скорости капель Wf

Численное решение системы уравнений для описания движения капель

1. Запишем далее систему уравнений движения капли:

$$\begin{cases} \frac{dW_r}{dt} = \frac{W_\varphi^2}{r} + \psi \frac{\pi \mu_r d_k}{8m} (V_r - W_r), \\ \frac{dW_\varphi}{dt} = -\frac{W_r W_\varphi}{r} + \psi \frac{\pi \mu_r d_k}{8m} (V_\varphi - W_\varphi). \end{cases} \quad (2.52)$$

2. Вводим параметры, позволяющие рассчитать траекторию капли: $K = \psi \frac{\pi \mu_r d_k}{8m}$, плотность газа, коэффициент лобового сопротивления (ψ), диаметр капель, плотность жидкости, вязкость жидкости, массу капель.

3. Вводим начальные координаты точки старта капли: r, φ .

4. Задаем шаг изменения по угловой координате φ .

5. Начинаем цикл:

5.1. Задаем количество шагов в общем расчете.

5.2. Рассчитываем скорости газа в данных координатах:

$$\begin{cases} V_r(r, \varphi) = \frac{r^2 C1 \sin(2\varphi) + r^2 C2 \cos(2\varphi) + C3}{r} \\ V_\varphi(r, \varphi) = \frac{1}{r} (-r^2 C2 \sin(2\varphi) + r^2 C1 \cos(2\varphi) + (r^4 C1^2 \cos(2\varphi)^2 + \\ + r^4 C1^2 \sin(2\varphi)^2 + r^4 C2^2 - C3^2)^{1/2}). \end{cases} \quad (2.53)$$

5.3. Находим решение системы уравнений численно согласно данным r и φ , при заданных нами начальных условиях.

5.4. Рассчитав составляющие скорости, считаем перемещения по осям r и φ :

$$S_r = W_r(\tau) \cdot d\tau; \quad S_{\phi} = \tan(d\phi) \cdot r;$$

$W_r(\tau)$ просчитываем по программе, что выдает нам расчетный модуль.

5.5. Учитывая то, что точка за расчетное время прошла часть траектории, рассчитываем новое положение капли:

$$r = r + W_r(\tau) \cdot d\tau; \quad \phi = \phi + d\phi;$$

5.6. Для построения графика траектории в декартовых координатах приводим формулы для перехода из цилиндрических координат в декартовы:
 $x = r \cdot \cos(\phi); \quad y = r \cdot \sin(\phi);$

6. Строим график траектории точки и границы канала.

7. Зная количество итераций, посчитанных до попадания капли в фильтрующий элемент, находим время ее движения и строим график скорости:

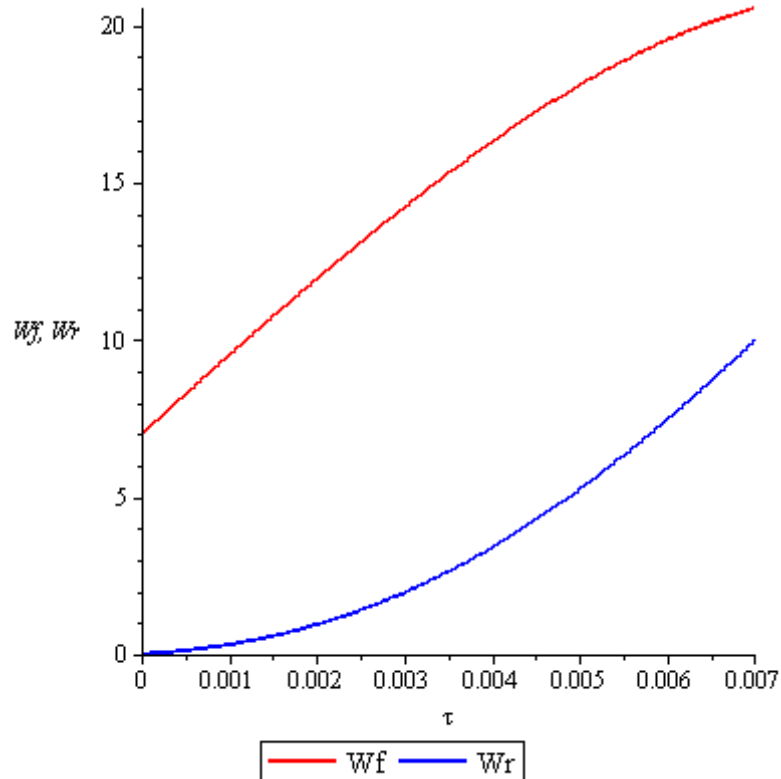


Рисунок 2.21 – График изменения скорости капли, $d_k = 5$ мкм

В результате расчета траектории капли по разработанному алгоритму получаем графические зависимости для капель различного диаметра в гофре 1.

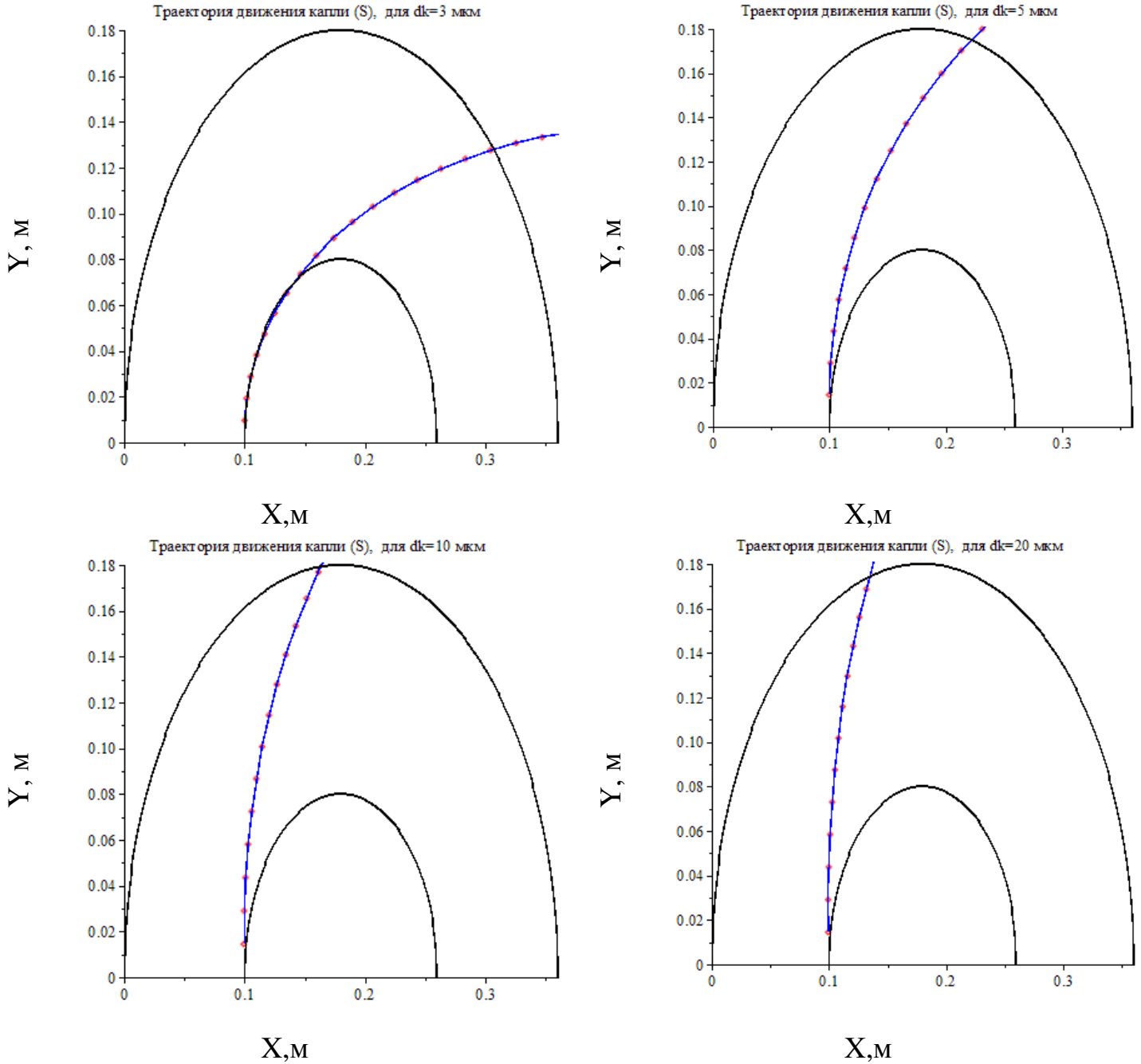


Рисунок 2.22 – Траектории движения капель различного диаметра в гофре 1

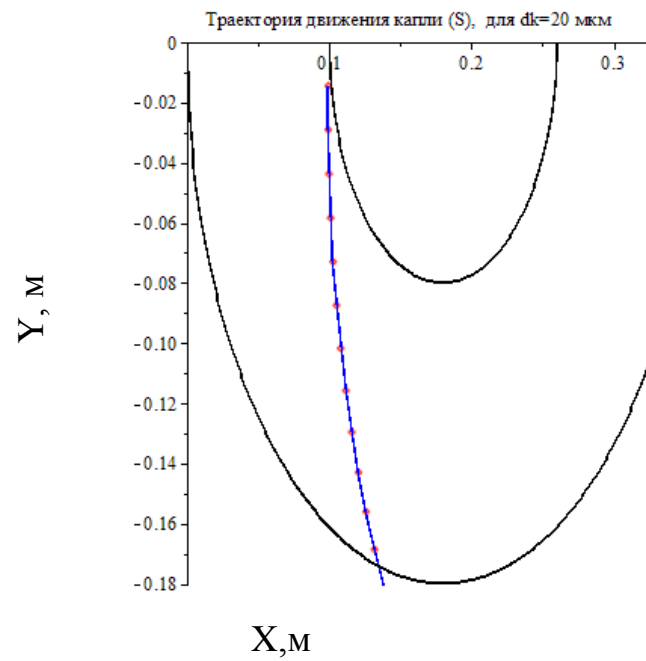
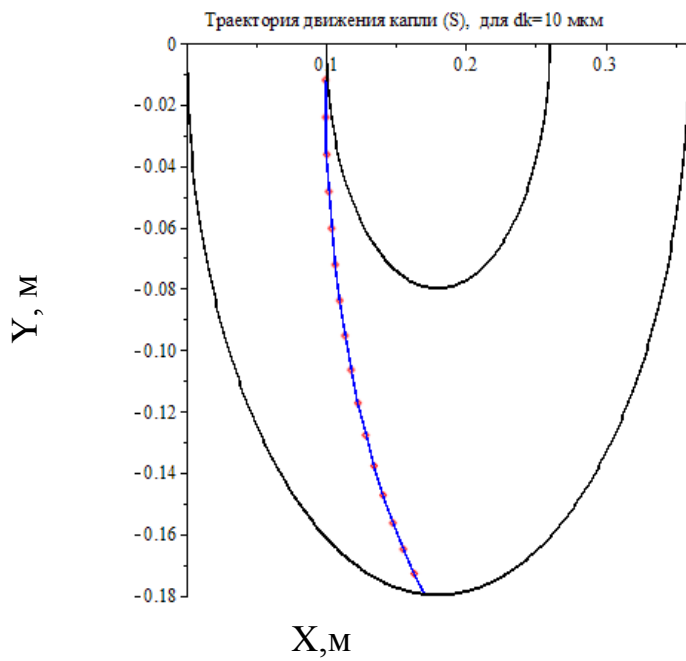
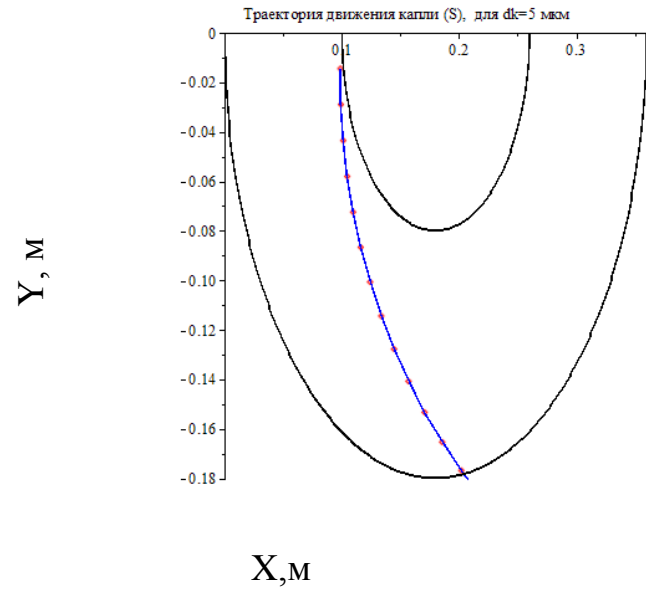
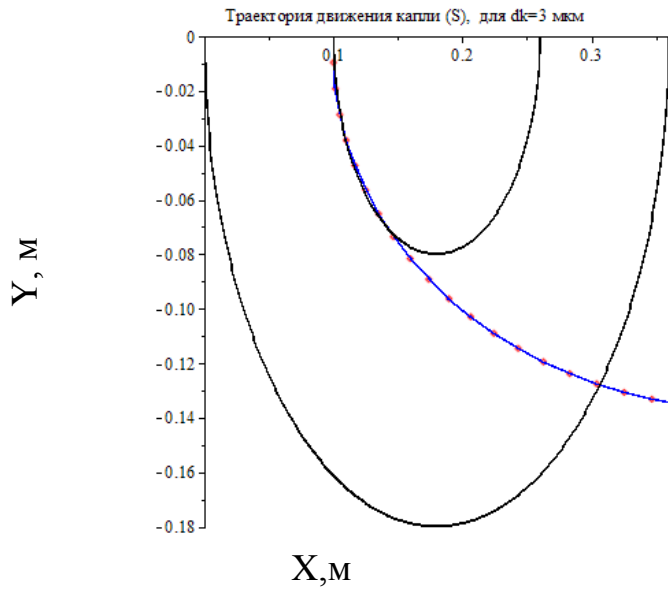


Рисунок 2.23 – Траектории движения капель различного диаметра в гофре 2

Листинг программы расчета скорости капель и их траектории приведен в приложении Ж.

Анализируя полученные графические зависимости траектории движения капель, мы видим, что капли большего диаметра осаждаются в начале гофры (диаметры 20 мкм и 10 мкм), а меньшего диаметра (5 и 3 мкм) – посередине и во второй половине, что соответствует физической модели, изложенной в диссертации.

По разнице точек пересечения траектории и внешней гофры можем определить место расположения фильтрующего элемента для эффективного разделения газожидкостной смеси в нашем канале.

При сравнении полученных графических зависимостей можно сказать, что это решение адекватно и может быть применено в инженерных расчетах.

Для того, чтобы определить на основании закона логнормального распределения капель по размерам в потоке на входе в сепарационный канал, предлагаем воспользоваться материалами [75], в которых рассматривается континуальная модель криволинейного течения газодисперсного потока. Далее предлагаем использовать предложенную математическую модель с адаптацией под гидродинамические условия криволинейного канала инерционно-фильтрующего сепаратора и расчетным методом определять сепарационные характеристики.

1. На входе мы задаем логнормальный закон распределения капель в потоке газа согласно рисунку 2.24.

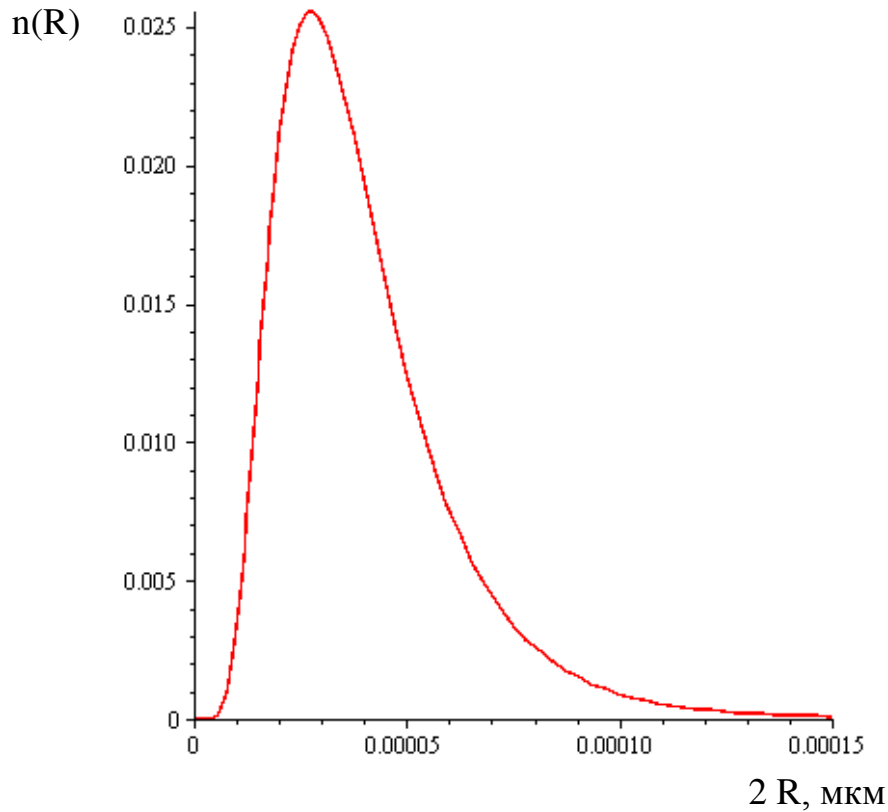


Рисунок 2.24 – Логнормальный закон распределения капель

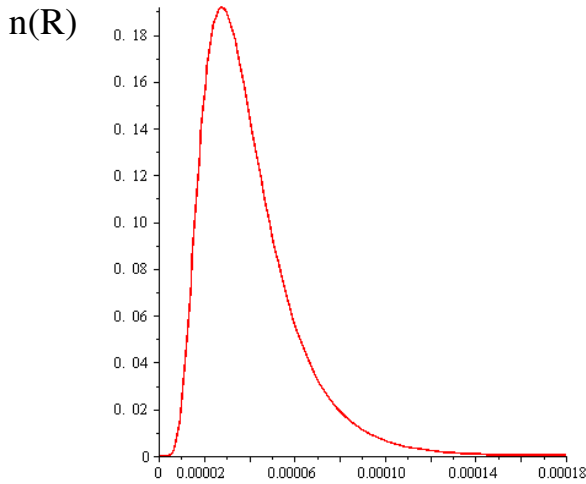
2. Вводим исходные данные по геометрии канала и физическим свойствам газа и жидкости и считаем распределение капель (nR) в конце кольцевого канала при $\varphi=\pi$, получая графики [75]:

$$nRi = \rho_0 \frac{V_m}{V_m - \frac{2C \varphi (r - \bar{r})}{r_2 - r_1}} \exp\left(-\frac{4\tau_0 \varphi}{(r_2 - r_1)} (2V_m(\bar{r} - r) + \frac{C \varphi (3r^2 - 6\bar{r}r + r_1 r_2 + 2\bar{r}^2)}{r_2 - r_1})\right), \quad (2.54)$$

где nRi – плотность распределения капель в конце кольцевого канала;

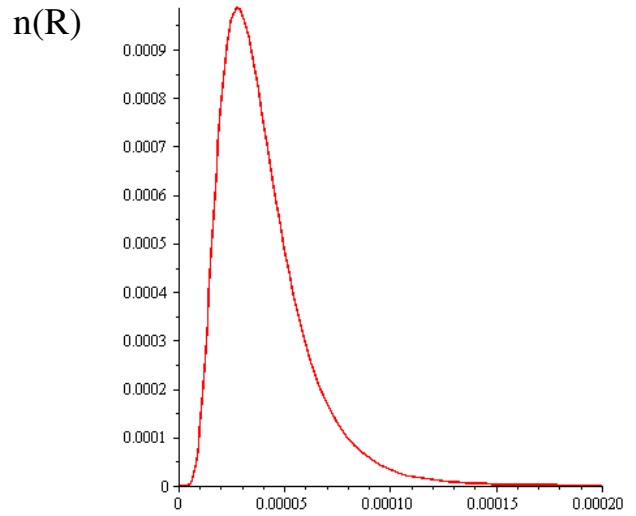
C – функция распределения капель на входе в гофру;

τ_0 – время релаксации капли.



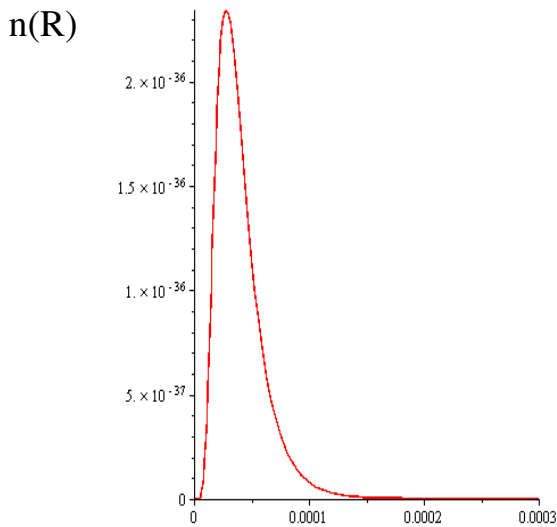
2 R, мкм

Рисунок 2.25–Плотность распределения капельв конце гофры 1



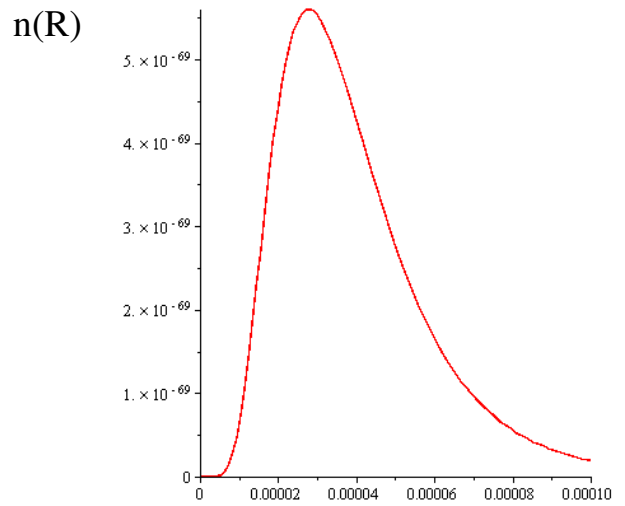
2 R, мкм

Рисунок 2.26–Плотность распределения капельв конце гофры 2



2 R, мкм

Рисунок 2.27–Плотность распределения капельв конце гофры 3



2 R, мкм

Рисунок 2.28–Плотность распределения капельв конце гофры 4

Далее представлены расчеты эффективности работы каждой гофры по разделению газожидкостной смеси

$$nR := \frac{0,00000783889066e^{-2,083333334\ln(28187,42129d)^2}}{d}. \quad (2.55)$$

$$nR_1 = \frac{1}{d(1 - 62,60000000Cw)} (0,000006029530051e^{-2,083333334\ln(28187,42129d)^2} \times \\ \times e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000 - 0,6886000000 Cw)}). \quad (2.56)$$

$$nR_2 = -\frac{1}{d(1 - 62,60000000Cw)} (0,02014177312e^{-2,083333334\ln(28187,42129d)^2} \times \\ \times e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000 - 0,6886000000 Cw)}). \quad (2.57)$$

$$nR_3 = -e^{-5,008000000} - \frac{1}{d(1 - 62,60000000Cw)} \times \\ \times 0,347295409e^{-2,083333334\ln(28187,42129d)^2} e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000 - 0,6886000000 Cw)} + \\ + \frac{1}{d(1 - 62,60000000Cw)} (1,260874997e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000 - 0,6886000000 Cw)}) \\ + (1,29 e^{-5,008000000} + 22,24288176e^{-5,008000000} - \\ - \frac{1}{d(1 - 62,60000000Cw)} 0,3472954092e^{-2,083333334\ln(28187,42129d)^2}). \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned}
nR_4 = & (e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000-0,6886000000 Cw)}) / (1 + \\
& + \frac{1}{d(1 - 62,600000000Cw)} (1,260874997e^{-2,083333334 \ln(28187,42129d)^2} \times \\
& \times (e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000-0,6886000000 Cw)}) / 1 - (80,754000000e^{5,008000000} - \\
& - \frac{1}{d(1 - 62,600000000Cw)} (0,3472954092e^{-2,083333334 \ln(28187,42129d)^2} \times \\
& \times e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000-0,6886000000 Cw)}) + (1 + \\
& + \frac{1}{d(1 - 62,600000000Cw)} 1,260874997e^{-2,083333334 \ln(28187,42129d)^2} \times \\
& \times e^{-5,350427348 \cdot 10^7 d^2(-0,200000000-0,6886000000 Cw)})). \tag{2.59}
\end{aligned}$$

nR_1 – плотность распределения капель в 1-й гофре;

nR_1 – плотность распределения капель в 1-йгофре;

nR_2 – плотность распределения капель в 2-йгофре;

nR_3 – плотность распределения капель в 3-йгофре;

nR_4 –плотность распределения капель в 4-йгофре.

Как результат,–следующий график:

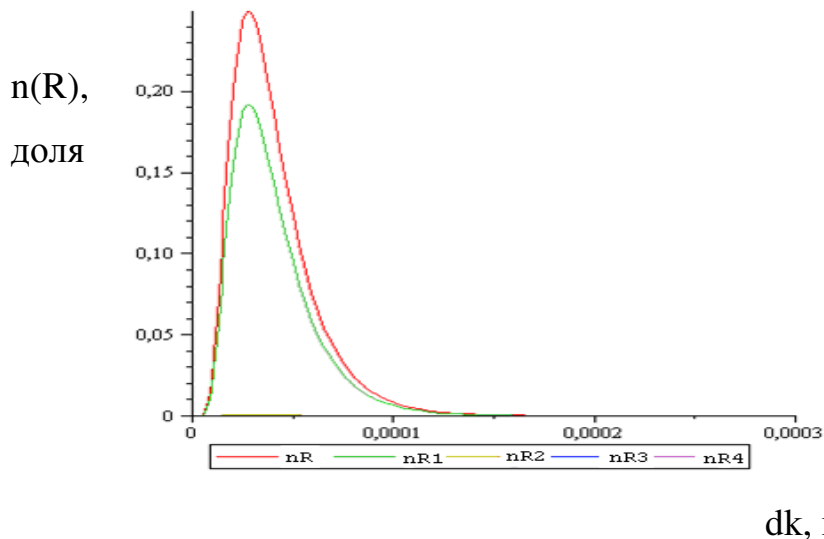


Рисунок 2.29 – Кривые распределения капель по гофрам (результаты расчетов)

Для того чтобы определить содержание жидкости в газе, мы находим интеграл полученной функции:

$$k_i = G_i = \int_0^{2^y} n(R, d=0..0.0003); \quad G_i = \int_0^{2^y} n(R) \quad (2.60)$$

$$k_1 := 0,000009625416240,$$

$$k_2 := 0,000007420321800,$$

$$k_3 := 3,81533456110^{-8},$$

$$k_4 := 9,10974239010^{-41},$$

$$k_5 := 2,16532011410^{-73}.$$

Зная количество влаги в каждой гофре, можем определить эффективность ее работы по формуле ниже:

$$\eta_1 = 100 \cdot (k_1 - k_2) / k_1; \text{ или } \eta_1 = 100 \cdot (G_1 - G_2) / G_1. (2.61)$$

Результаты расчет по каждой гофре следующие:

$$\eta_1 := 22,9;$$

$$\eta_2 := 99,6;$$

$$\eta_3 := 100;$$

$$\eta_4 := 100.$$

Показано, что для эффективного улавливания влаги достаточно 3 гофры.

Выводы к разделу 2

1. Разработана физическая модель формирования и движения газок капельных потоков в рабочей полости инерционно-фильтрующих сепараторов, а также улавливания капель жидкости фильтрующим элементом.
2. На основании теоретического анализа физической и математической модели гидродинамики в криволинейном канале инерционно-фильтрующего сепаратора получено аналитическое решение системы дифференциальных уравнений движения и неразрывности потока, позволяющее определить поле скоростей газового потока для частного случая плоского неосесимметричного течения в криволинейном канале, ограниченного стенками синусоидального профиля.
3. Для уточнения частного решения дифференциальных уравнений математической модели необходимо определить значения констант интегрирования в зависимостях от радиальной и тангенциальной составляющих локальных скоростей газового потока в криволинейном канале, проведя аэродинамическое зондирование на экспериментальной модели канала инерционно-фильтрующего сепаратора.
4. Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений движения капель в рабочей области инерционно-фильтрующего сепаратора, исходя из баланса действующих на нее сил, представляет существенные трудности, а полученное численное решение позволяет определить траектории движения капель и осуществить геометрическое профилирование криволинейных каналов с фильтрующими элементами.
5. На основании закона логнормального распределения капель по размерам в потоке на входе в сепарационный канал, а также используя континуальную модель криволинейного течения газодисперсного потока расчетным методом определены сепарационные характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах [56,119,121,122,123,135,138].

РАЗДЕЛ 3

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Описание экспериментальных установок

Для проведения экспериментальных исследований работы инерционно-фильтрующего элемента сконструирован лабораторный стенд, технологическая схема которого приведена на рисунок 3.1.

Исследование предлагалось проводить на основе теории подобия на подобной системе воздух-вода в области атмосферных давлений для удобства зондирования. Геометрические соотношения канала были получены в разделе 2. Область изменения размеров капель обоснована характеристиками выбранной пневматической форсунки. Расход газа подбирался так, чтобы обеспечить подобие гидродинамических режимов с реальным сепаратором.

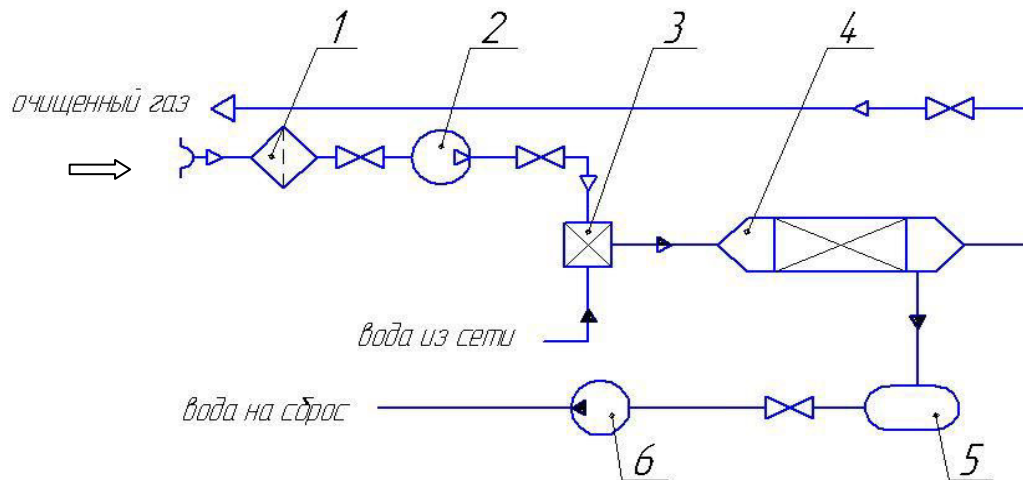


Рисунок 3.1 – Схема экспериментального стенда:

- 1 – фильтр; 2 – газодувки; 3 – смеситель; 4 – инерционно-фильтрующий элемент;
5 – приемный бак; 6 – циркуляционный насос

Газовый поток, проходя через фильтр 1, под действием давления, создаваемого газодувками 2, попадает в блок смешения 3, где соединяется с дисперсной влагой. Далее газожидкостный поток попадает в инерционно-фильтрующий элемент 4, где происходит улавливание дисперсных частиц. Уловленная жидкость отводится из элемента в виде пленки и по дренирующим каналам попадает в приемный бак 5. Уловленная влага отводится из установки при помощи плунжерного насоса 6, а очищенный газ попадает в атмосферу.

Пространственная модель исследуемых инерционно-фильтрующих элементов показана на рисунке 3.2 и 3.3.

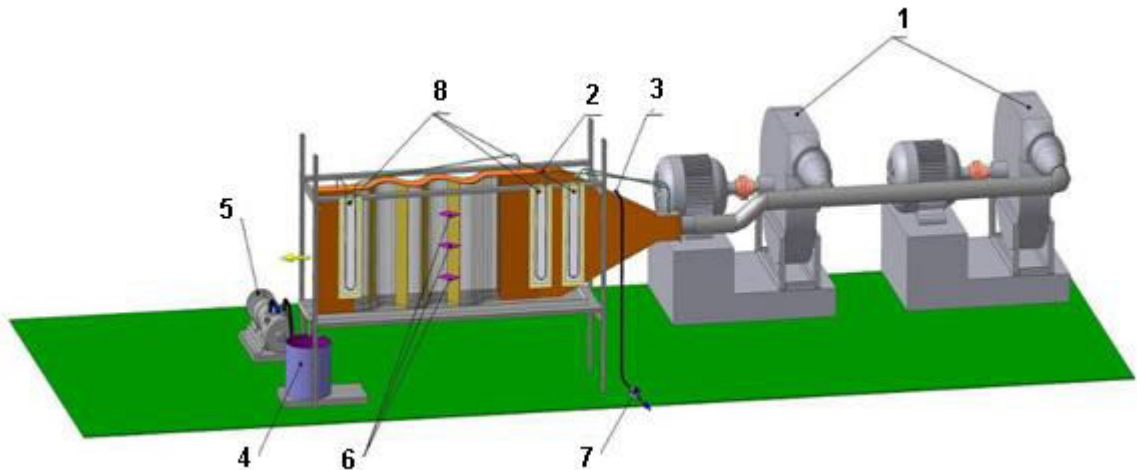
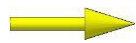



Рисунок 3.2 – Экспериментальный стенд с лотками для отвода жидкости по высоте фильтра (высота 600 мм):

-  – поток очищенного газа;
-  – поток жидкости;

1– газодувки; 2 – инерционно-фильтрующая установка; 3 центробежная форсунка; 4 – бункерная емкость; 5 – насос; 6– лотки; 7 – счетчик для измерения расхода воды; 8– манометры U-образные

Экспериментальный стенд работает следующим образом: газовый и жидкостный поток подается в пневматическую форсунку и далее (уже как

газожидкостный поток) направляется к инерционно-фильтрующему элементу, где происходит улавливание дисперсных частиц. Инерционно-фильтрующая часть состоит из четырёх гофр, произведенных из оргстекла для визуального наблюдения за процессом, на каждой из которых закреплен фильтрующий элемент. Газ, пройдя инерционно-фильтрующую часть, отделяется от жидкой фазы и выводится в атмосферу. Для отвода уловленной жидкости из инерционно-фильтрующего элемента установлен лоток внизу жалюзи, из которого жидкость отводится в емкость 4 и с помощью плунжерного насоса 5 – в канализацию.

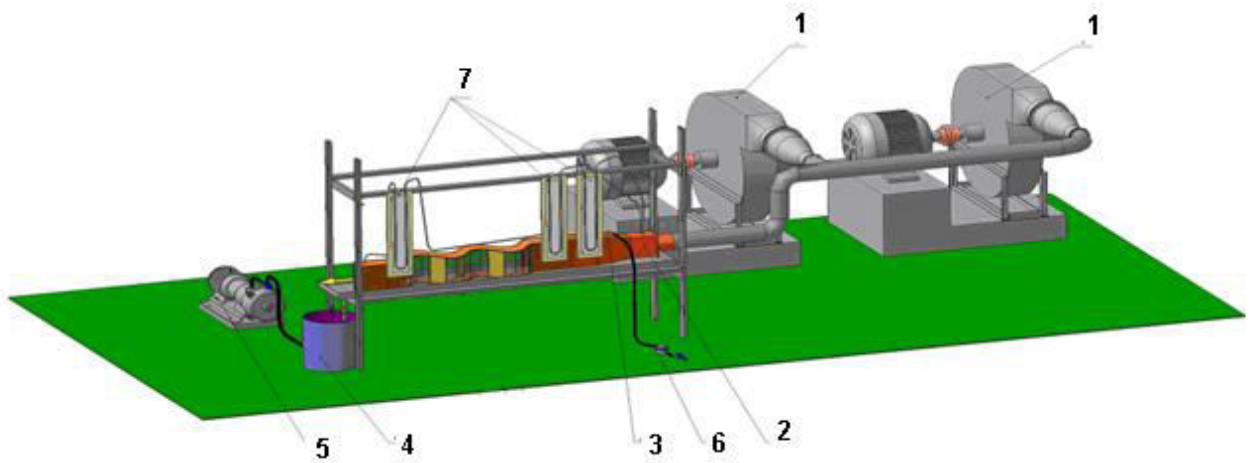


Рисунок 3.3 – Экспериментальный стенд с высотой гофры 150 мм.

- 1 – газодувки; 2 – инерционно-фильтрующая установка; 3 – центробежная форсунка; 4 – бункерная емкость; 5 – насос; 7 – бытовой счетчик для измерения расхода воды; 8- манометры U-образные

Для меньшего расхода материала и мобильности установки высота канала уменьшена с 600 до 150 мм при сохранении режимов течения газа и жидкости. Расстояние между гофрами принято 100 мм исходя из объемного расхода воздуха, который подают газодувки. Только такие данные могут обеспечить гидродинамические параметры, при которых происходит разделение газожидкостных систем в канале инерционно-фильтрующего сепаратора, что

подтверждено визуальными наблюдениями (это обусловлено наличием только такого лабораторного оборудования).

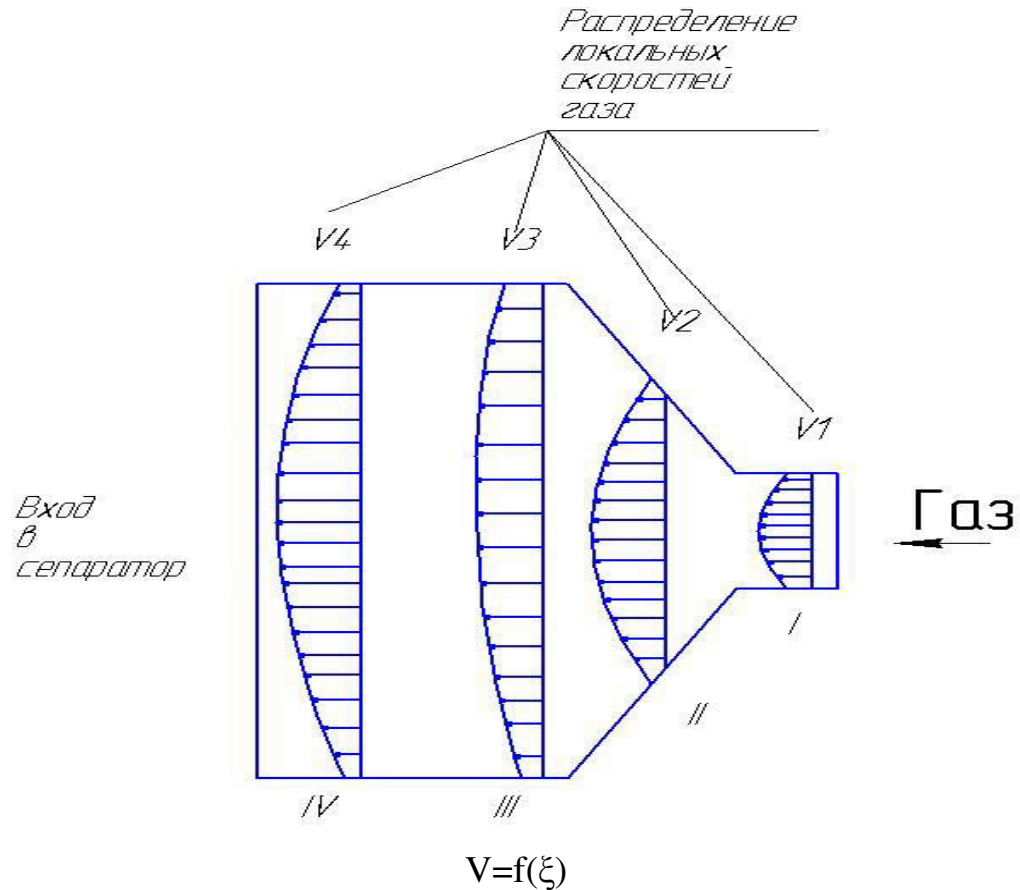


Рисунок 3.4 – Эпюры перераспределения поля скоростей газа в диффузоре

В основу физического моделирования положены методы теории подобия. В опытах на модели (по сравнению с промышленными условиями) уменьшены геометрические размеры канала. Геометрическое сходство поддерживается равенством констант и инвариантом геометрического подобия. Также подразумевается обязательное выполнение условия: сходство движения соответствующих капли и их траекторий в натуре и в модели.

Для проведения расчета траектории движения капли необходимо подобрать математические выражения, которые описывают зависимости составляющих скорости газа (V_x и V_y) от геометрических размеров канала. Для проведения

таких замеров изготовлен специальный стенд с градуировкой, конструкция которого представлена выше, а параметры гофры (длина прямолинейного участка, угол раскрытия, радиус гофры) – на рисунок 3.4.

В конструкцию образца внесены изменения: канал располагается на прямоугольной сетке с координатными осями X и Y, что позволяет с высокой точностью позиционировать зонд.

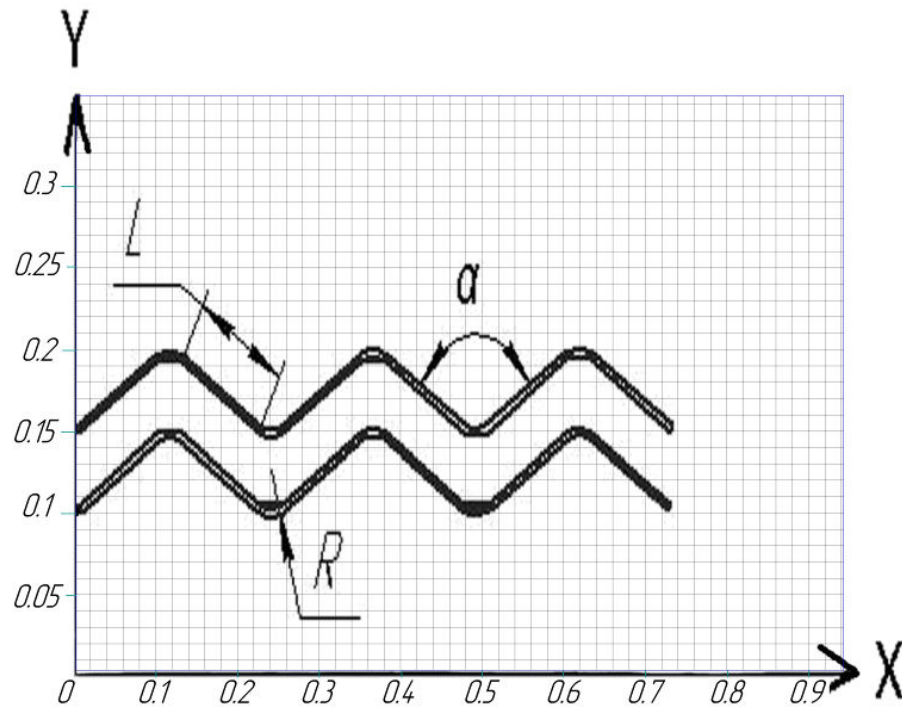


Рисунок 3.5 – Исследуемые геометрически размеры криволинейного сепарационного канала: L – длина прямолинейного участка, м; R – радиус криволинейного участка, м; α – угол раскрытия гофры, град

Диапазон изменения параметров: нагрузка по газу: $0,2-0,306 \text{ м}^3/\text{с}$; $L=100, 150, 200 \text{ мм}$; $R=25, 55, 100 \text{ мм}$; $\alpha=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$. Расстояние между гофрами – 100 мм .

3.2. Исследуемые гидродинамические характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов

Основные гидродинамические характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов:

1. поле скоростей газа;
2. поле давления газа;
3. гидравлическое сопротивление газосепарационного элемента;
4. эффективность разделения жидкости и газа;
5. определение оптимального гидродинамического режима движения газожидкостного потока с максимальной эффективностью;
6. определение влияния геометрических характеристик канала (L, R, α) инерционно-фильтрующего сепаратора на гидродинамику течения газа.

Геометрические параметры обладают наибольшим влиянием на условия работы инерционно-фильтрующей элемента, поэтому их влияние на гидродинамику нужно изучить.

Зная поля скоростей газа, имеем возможность анализировать распределение скоростей по сечению канала. Все эти значения можно определить после построения графиков, составляющих скорости в V_r и V_f или V_x и V_y .

Зная поля скоростей, можно определить режим течения газового и газожидкостного потока. Таким образом, при проектировании промышленных образцов мы сможем сохранить режимные параметры разделения газожидкостной системы. Это дает возможность утверждать, что исследования, проведенные на данной экспериментальной установке, адекватны и могут быть применены для промышленного образца.

В результате накопления и обработки данных получены графики составляющих скоростей V_x и V_y , которые аппроксимированы полиномом.

Полученные в результате физического моделирования данные представлены в виде графических зависимостей на рисунок 3.6.

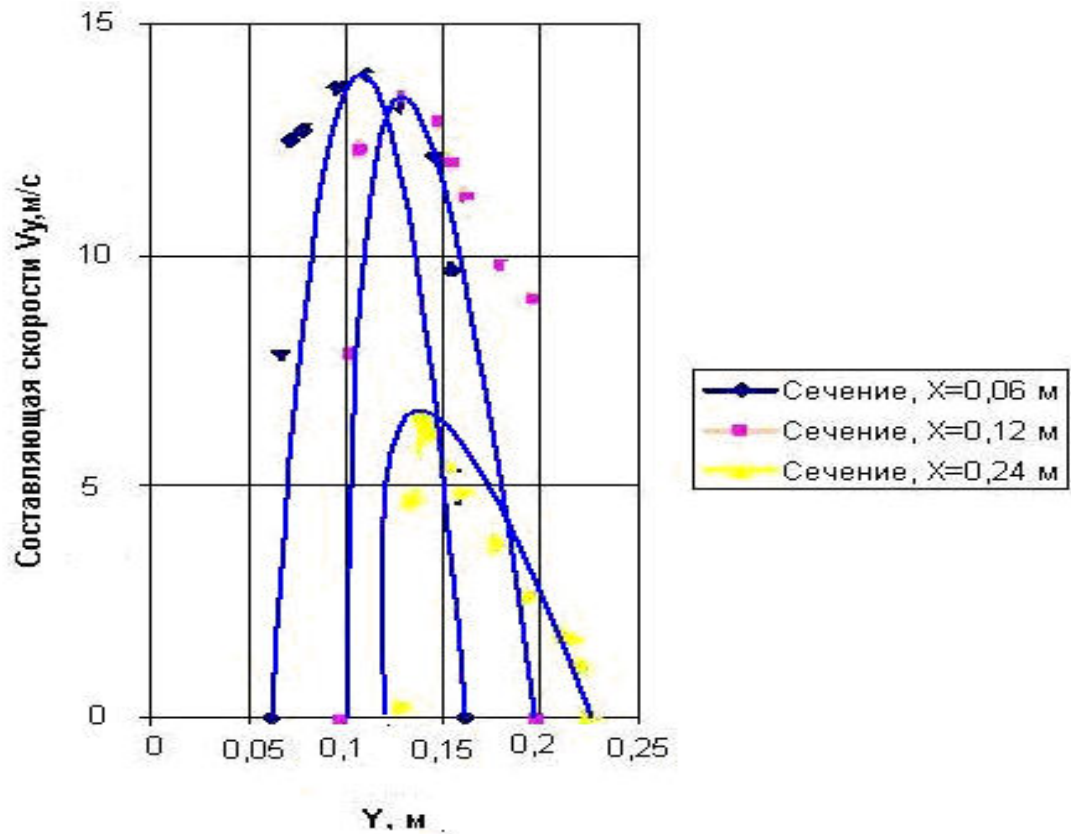


Рисунок 3.6 – Пример эпюры скоростей по сечению канала при фиксированном значении параметра X при $Re=162238$

Поле давления дает возможность определить зоны повышенных и пониженных давлений газа.

В зоне пониженных динамических напоров устанавливается фильтрующий элемент, что дает возможность уловленные капли отвести по внутренней поверхности гофры. Если мы установим фильтрующий элемент в зоне повышенных динамических напоров, то возможно наличие вероятности вторичного брызгоуноса, а также срыва пленки уловленной жидкости.

Замер гидравлического сопротивления нужен для того, чтобы узнать потери энергии потока, которое расходуется на трение в инерционно-

фильтрующем элементе при разделении газожидкостной смеси. Тогда можно подобрать оптимальный гидродинамический режим, при котором образуется высокая степень разделения газожидкостной системы, при этом энергетические затраты будут на достаточном уровне. Таким образом, можно разработать рекомендации для проектирования промышленных образцов.

3.3. Методы замера экспериментальных значений основных характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов

Согласно существующим методикам планирования эксперимента таких авторов, как: М.С. Винарский, М.В. Лурье, В.Г. Горский, Ю.П. Адлер, Н. Джонсон, Ф. Лион [61, 62], проведено обобщение, в результате которого используется общепринятая методика для замера эффективности работы инерционно-фильтрующего сепаратора, описание которой приведено ниже.

1. Замеряется количество жидкости, входящей в аппарат, с помощью бытового счетчика ResidiaJet (максимальный замеряемый расход $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ для Residia-Jet QN 1,5, максимальное избыточное давление 1 МПа.).

2. Жалюзи расположены в лотке, который накапливает уловленную жидкость и отводит в буферную емкость.

3. Уловленная жидкость собирается в буферной емкости, из которой отводится насосом. Учитывая разницу в уровнях жидкости в емкости дои после эксперимента, определяем точное количество жидкости, которое было уловлено. С повышением времени замера повышается и точность измерения.

Для замера показателей скорости мы используем трубки Пито-Прандтля совместно с микроманометром ММН 240. Погрешность прибора составляет $\pm 1\%$. Данный прибор измеряет как избыточное давление, так и вакуум.

Для замера скорости используем трубки Пито-Прандтля.



Рисунок 3.7 – Внешний вид микроманометра ММН 240

Методика замера скорости: трубку опускаем в исследуемую зону, помещаем транспортер, с помощью которого измеряем угол атаки газового потока, и вращаем трубку до тех пор, пока показатели в ветках U-образного манометра, к которым подключены трубки статического напора, не будут равны. Если показатели трубок стали одинаковыми, снимаем показания с центральной трубки полного напора, канал от которой идет на микроманометр. После этого берем еще одну трубку и измеряем статический напор в данной точке. Используем трубки, которые прошли тарирование и проверку. После этого проводим математическую обработку полученных данных при замерах узнаем полную скорость, а также ее составляющие V_r и V_f , или V_x и V_y [77].

Для измерения количества воздуха мы используем диафрагму, подсоединенную к U-образному манометру, показывающему перепад давления на ней. По тарировочному графику определяем расход воздуха в $\text{м}^3/\text{с}$.

Для расхода жидкости при исследовании двухфазных потоков используем бытовой счетчик, для подачи газа – вентиляторы высокого давления ВВД-5 и ВВД-10[81], характеристики которых приведены ниже.

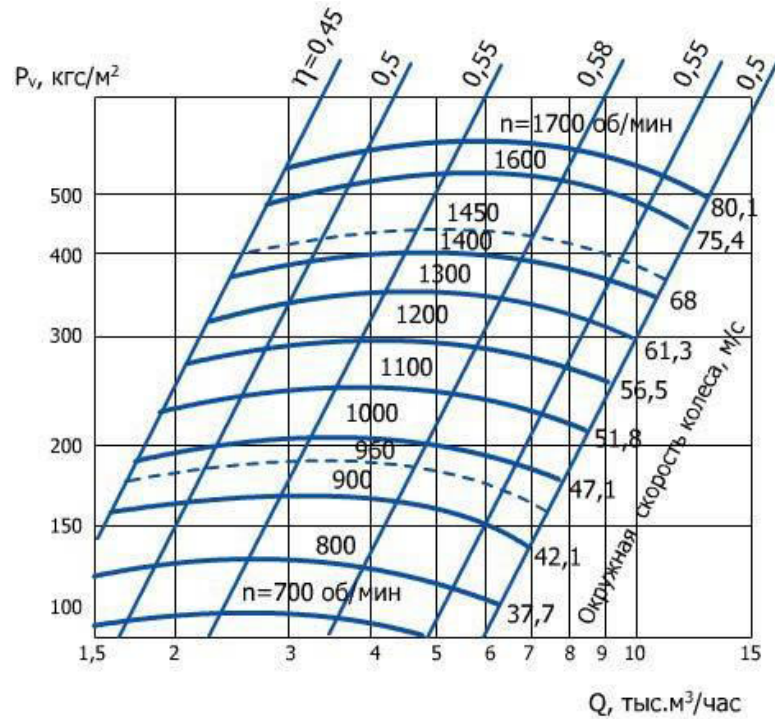


Рисунок 3.8 – Аэродинамическая характеристика ВВД-10

Для изучения гидродинамики в инерционно-фильтрующем элементе через 15° в радиальном направлении наносилась сетка замера скорости (при определении скоростей в цилиндрической системе координат), в которой каждая линия замера разбивалась на 5 точек. При исследовании течения двухфазных потоков в газосепараторах одной из важных измеряемых характеристик является эффективность разделения газожидкостной смеси. Также важно гидравлическое сопротивление газосепарационного элемента, для замера которого используются точка 1 в начале гофры и точка 2 в конце гофры, куда вставляются две трубки статического напора и подсоединяются к U-образному манометру, с помощью которого можно видеть перепад давления на данном устройстве.

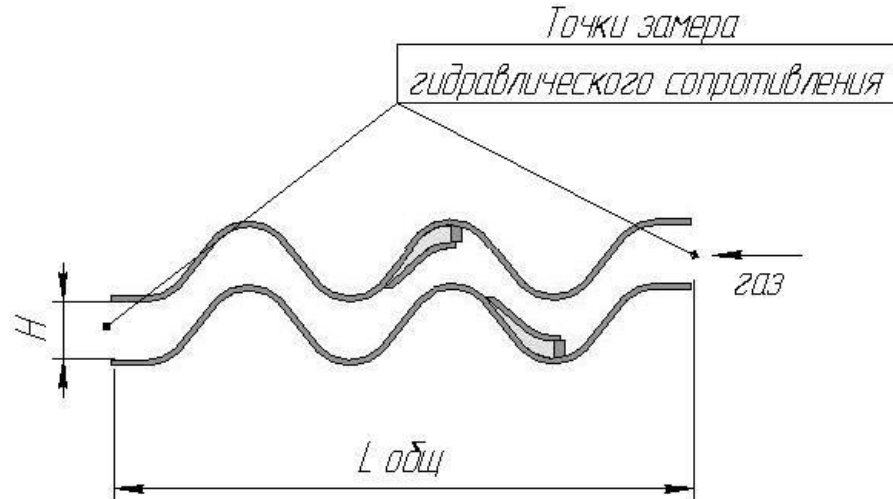


Рисунок 3.9 – Точки замера гидравлического сопротивления

Для замера эффективности используется такой алгоритм: количество жидкости на входе замеряем бытовым счетчиком Residia Jet. Для замера уловленной жидкости используется емкость, а для ее отвода – плунжерный насос. Зная производительность и время работы насоса, находим количество отведенной жидкости в данное время. Для определения эффективности просчитываем соотношение количества отведенной жидкости к жидкости, поданной в инерционно-фильтрующий элемент.

Учитывая, что рассматривается турбулентный режим, сделано предположение: радиальная составляющая скорости имеет квадратичную зависимость от параметров r и φ [51].

Вследствие этого выражение для нее будет иметь вид

$$V_r(r, \varphi) = A_1\varphi^2 + A_2r^2 + A_3r\varphi + A_4\varphi + A_5r + A_6, \quad (3.1)$$

где $A_1 \dots A_6$ – коэффициенты.

Имея общий вид зависимости радиальной составляющей скорости от сменных параметров, можно найти значение для тангенциальной составляющей скорости, используя уравнение неразрывности потока

$$V_r(r, \varphi) = -\frac{1}{3}A_1\varphi^3 - \frac{1}{2}(2rA_3 + A_4)\varphi^2 + (-3A_2r^2 - 2A_5r - A_6)\varphi + F_1(r), (3.2)$$

где $F_1(r)$ – константа интегрирования.

Для нахождения константы используем одно из граничных условий, когда значение $V_\varphi = V_{\varphi_1}$:

$$V_{\varphi_1}(r, \varphi_1) = \frac{Q}{S}, (3.3)$$

где Q – объемный расход газа, м³/с;

S – площадь поперечного сечения канала, м².

$$F_1(r) = V_{\varphi_1} + \frac{1}{3}A_1\varphi_1^3 + \frac{1}{2}(2rA_3 + A_4)\varphi_1^2 - (-3A_2r^2 - 2A_5r - A_6)\varphi_1. (3.4)$$

Тогда общий вид зависимости V_φ от параметров r и φ будет иметь вид

$$V_\varphi(r, \varphi) = -\frac{1}{3}A_1\varphi^3 - \frac{1}{2}(2rA_3 + A_4)\varphi^2 + (-3A_2r^2 - 2A_5r - A_6)\varphi + V_{\varphi_1} + \frac{1}{3}A_1\varphi_1^3 + \frac{1}{2}(2rA_3 + A_4)\varphi_1^2 - (-3A_2r^2 - 2A_5r - A_6)\varphi_1. (3.5)$$

После определения общих выражений для скоростей главной задачей является определение коэффициентов $A_1..A_6$, из данных, полученных в результате проведения эксперимента:

Проведем группирование элементов для нахождения коэффициентов в уравнениях:

а) для радиальной составляющей скорости при фиксированном значении угла φ_1 :

$$(A_6 + A_4\varphi_1 + A_1\varphi_1^2) + (A_3\varphi_1 + A_5)r + A_2r^2 = C_1 + C_2r + C_3r^2, (3.6)$$

где $C_1..C_3$ – коэффициенты;

б) для радиальной составляющей скорости при фиксированном значении радиуса r :

$$(A_6 + A_5 r_1 + A_2 r_1^2) + (A_3 r_1 + A_4) \varphi + A_1 \varphi^2 = D_1 + D_2 \varphi + D_3 \varphi^2, \quad (3.7)$$

где $D_1 \dots D_3$ – коэффициенты.

При проведении эксперимента определим некоторое количество значений для: Vr при фиксированном значении r , Vr при фиксированном φ .

С помощью системы (3.13) определим характер зависимости и значение коэффициентов C и D , введенных для удобства расчетов.

Определяя экспериментальные коэффициенты (C и D) на основе результатов замера, можем найти коэффициенты $A_1 \dots A_6$, исходя из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} A_2 = C_3, \\ A_3 \varphi_1 + A_5 = C_2, \\ A_6 + A_4 \varphi_1 + A_1 \varphi_1^2 = C_1, \\ A_1 = D_3, \\ A_3 r_1 + A_4 = D_2 \\ A_6 + A_5 r_1 + A_2 r_1^2 \end{cases} \quad (3.8)$$

После получения коэффициентов $A_1 \dots A_6$ находим общие выражения для двух составляющих скоростей и, подставив в два других уравнения системы, – зависимость $P(r, \varphi)$.

В результате решения системы уравнений получаем следующие выражения для:

- радиальной составляющей скорости;
- тангенциальной составляющей скорости;
- поля давления.

Методы обработки данных при использовании декартовой системы координат.

Одна из составляющих скорости равна [74]:

$$V=A_0+A_1x+A_2x^2+A_3x^3+A_4x^4+A_5x^5+A_6x^6, \quad (3.9)$$

где A_0-A_6 – динамические коэффициенты, зависящие от координаты Y и от точки расчета скорости газа;

x – координата расположения рассматриваемого сечения канала, м.

В результате проведения ряда математических экспериментов по подбору полинома для динамических коэффициентов (A_1-A_6) наиболее целесообразным их описанием является следующий полином(формула 3.15). При постепенном увеличении степени полинома от 1 до 6 было получено максимальное приближение к реальности, которое описывает изменение скорости по предположению, подтвержденном на рисунке 3.10:

$$A=B_0+B_1x+B_2x^2+B_3x^3+B_4x^4+B_5x^5+B_6x^6 \quad . \quad (3.10)$$

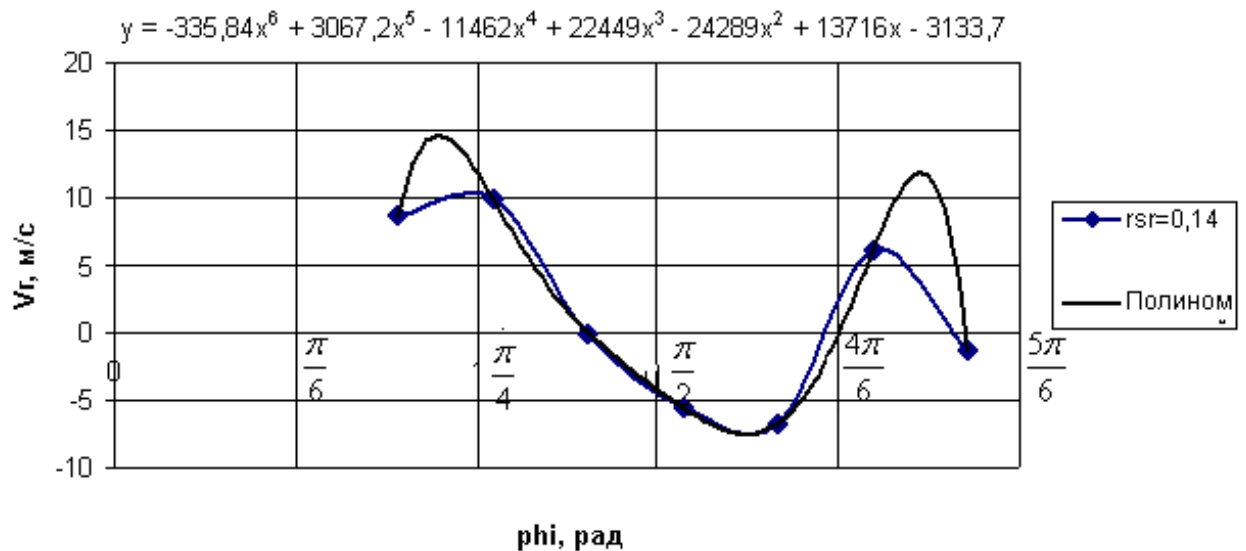


Рисунок 3.10 – Аппроксимация полиномом экспериментальных данных

3.4.Определение ошибок экспериментальных исследований характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов

При проведении экспериментальных исследований необходимо обрабатывать результаты, учитывая все виды погрешностей, которые могут повлиять на адекватность результатов.

Приборные погрешности. В нашем случае данная погрешность будет у двух приборов: 1- микроманометр; 2- диафрагма.

Наряду с приборными ошибками можно выделить еще две группы ошибок, возникающих в процессе эксперимента, - систематические и случайные.

Характерной особенностью систематических ошибок является их принципиальная устранимость или возможность коррекции.

Систематические ошибки можно устранить несколькими методами:

1. Использовать вместо воды в U-образных манометрах спирт, что уменьшит систематическую ошибку из-за большего, чем у воды, коэффициента объемного расширения.
2. Необходимо контролировать угол ввода зонда (он должен быть 90 градусов по отношению к жалюзи).
3. Подбирать угол зрения на прибор, так как это влияет на точность снятия показания.

Вышеперечисленные методы были использованы при проведении эксперимента.

Случайные ошибки устранить невозможно, также нельзя вывести формулу для исправления полученного результата. В тоже время влияние случайных ошибок может быть уменьшено проведением повторных измерений и статистической обработкой полученных данных [96].

Для устранения возможности грубой ошибки проводим серию измерений при одних и тех же параметрах, она равна 5 (согласно рекомендациям [54]).

Полученные результаты записываем в табл. 3.1, начиная их обработку:

$$V_{г\text{ ср}}, \text{ или } X_{\text{ ср}} = (11,822 + 10,526 + 9,691 + 9,809 + 9,379) / 5 \approx 10,25 \text{ м/с.}$$

Далее проводим анализ полученных в процессе эксперимента данных и исключаем явно ошибочные, которые существенно отличаются от общей массы, и их выбраковываем, делая выборку результатов.

Таблица 3.1

Данные измерений и их обработка

№	X	X ср	DX	DX ²	s ²	s
1	11,82	10,25≈10	1,57	2,46		
2	10,52		0,27	0,07		
3	9,69		-0,56	0,31		
4	9,8		-0,45	0,2	s ² ср.	s ср.
5	9,37		-0,88	0,77	0,95	0,974

$$DX_{\text{ср}} = (1,57 + 0,27 - 0,56 - 0,45 - 0,88) / 5 = -0,01$$

По данным табл. 3.1. видим, что величины DX характеризуют разброс данных. На практике для усредненной характеристики разброса серии измерений используется дисперсия выборки [55]:

$$s^2 = \frac{\sum(\Delta x)^2}{n-1} = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n-1} = \frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)},$$

$$s^2 = (2,46 + 0,07 + 0,31 + 0,2 + 0,77) / (5-1) = 0,95.$$

Среднеквадратичное, или стандартное, отклонение выборки [48]:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta x)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n(n-1)}}$$

$$s = \sqrt{0,95} = 0,974.$$

Далее рассчитываем общее значение и стандартное отклонение среднего значения, за счет чего есть возможность вычисления доверительного интервала, в котором будет колебаться наше значение скорости:

$$X_{\text{ср}} = (11,822 + 10,526 + 9,691 + 9,809 + 9,379) / 5 \approx 10,25 \text{ м/с.}$$

Дисперсию и стандартное отклонение среднего значения определяем по формулам [55]:

$$s_{\text{ср}}^2 = \frac{\sum(\Delta x)^2}{n-1}; s_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\sum(\Delta x)^2}{n-1}},$$

$$s_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{3,81}{5(5-1)}} = 0,44;$$

$$s_{\text{ср}}^2 = 0,19 \text{ при проведении 5 экспериментов.}$$

Определяем уровень надежности P по формуле, приведенной ниже, а также определяем коэффициент Стьюдента и находим доверительный интервал.

Для получения доверительного интервала необходимо сделать следующее:

$$\text{ДИ} = s_{\text{ср}} \cdot t_f \cdot P$$

$$\text{ДИ} = 0,44 \cdot 2,78 = 1,22$$

$$X = X_{\text{ср}} \pm \text{ДИ} = 10,25 \pm 1,22.$$

Сравниваем случайную и приборную погрешность, учитывая возможность варианта, что случайная погрешность будет больше, чем приборная. В этом случае проводим повторные измерения, и если случайная погрешность меньше, чем приборная, либо ей равна, то вычисляем общую ошибку по формуле [42]:

$$\text{ДИ} \geq d = 1,22 \geq 0,01.$$

Случайная погрешность больше, чем приборная. Повысить точность измерения можно, уменьшая случайную ошибку и повышая число измерений в серии, снижая требования к надежности.

В результате вычисления всех видов погрешностей записываем результат в виде $X = X_{\text{ср}} \pm \text{комплексная погрешность}$.

$$X = 10,25 \pm 1,22 = 11,46\%$$

После этого оцениваем относительную ошибку измерений, которую рассчитываем по формуле $E = \frac{DX}{X_{\text{ср}}} = \frac{1,22}{10,25} \times 100\% = 11,9\%$. Рассчитанная погрешность показывает, что измерения проведены с достаточной точностью для использования полученных данных в диссертационной работе.

3.5. Компьютерное моделирование течения газа в канале инерционно-фильтрующего элемента

Задача исследований — моделирование двухмерного течения газового потока в канале инерционно-фильтрующего сепаратора с целью их визуализации методами компьютерной графики в существующих конструкциях [46-48] и разработка рекомендаций относительно профилирования канала.

Для создания 3D –геометрических моделей на данном этапе развития компьютерной техники может применяться большое количество продуктов. Нами была избрана программа компании АСКОН Kompas 3D V13. С помощью программного продукта COSMOS Flowworks 2006 Pre-Release (<http://www.cosmosm.com/>) CAD-системы Solidworks 2006 (<http://www.solidworks.com/>) проведено моделирование течения газового потока.

Для моделирования были выбраны две жалюзи, расположенные на расстоянии. Проведение исследования нуждается в адаптации полученной модели: упрощении геометрии, удалении деталей, которые могут незначительно влиять на исследуемый процесс. Для этого все свободные входы и выходы

заменяются так называемыми «крышками» (деталью в виде прямоугольника, которые закрывают вход и выход в канал) и задаются граничные условия (Boundary conditions). В нашем случае заданы давление на входе в жалюзи и объемный расход газа на выходе из элемента. Для запуска расчетов необходимо выделить цели расчетов (Goals) и по окончании работы программы оценивать полученные данные за счет построения графиков, а также заливки разными цветами всего объема элемента или выбранных поверхностей.

При использовании автоматического образа построения графиков изменения любых величин применяем метод итераций.

Примеры полученных графиков приведены ниже при $Re=1622387$.

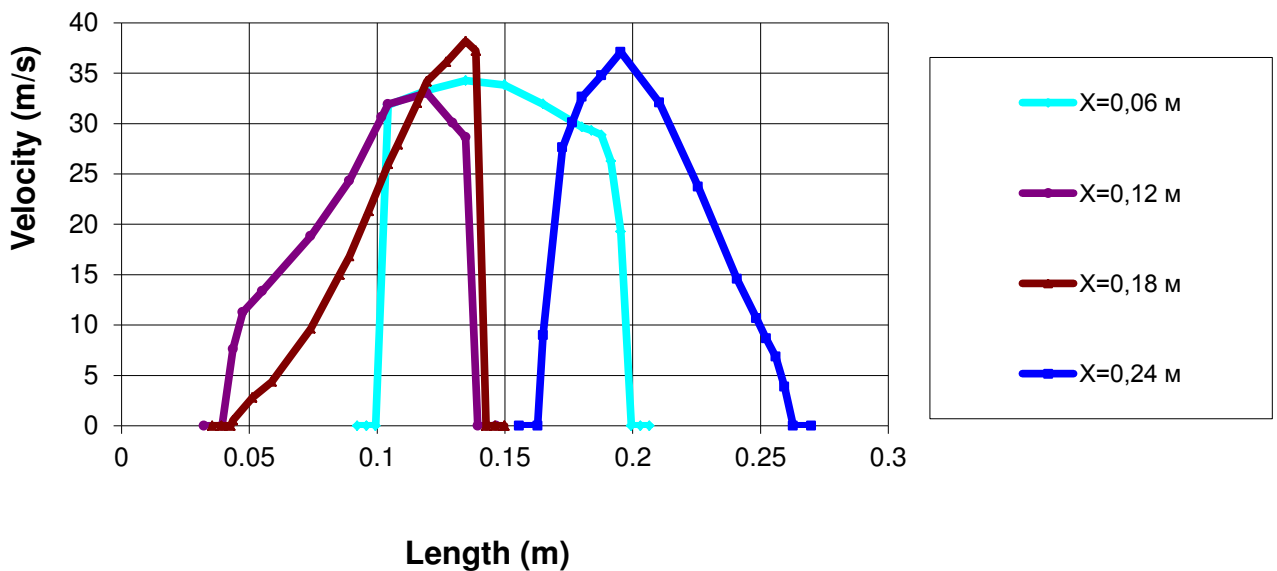


Рисунок 3.11– График изменения составных скорости в поперечном сечении канала при $X=0,12$ м

Визуализация результатов. Расчеты осуществлены с помощью встроенных в программу возможностей [139]. Анализ может производиться как в процессе расчетов, так и после его окончания. Постпроцессор предоставляет

большой выбор методов визуализации скалярных и векторных сменных на разных геометрических объектах, а также сохраняет данные в файл для обработки другими средствами.

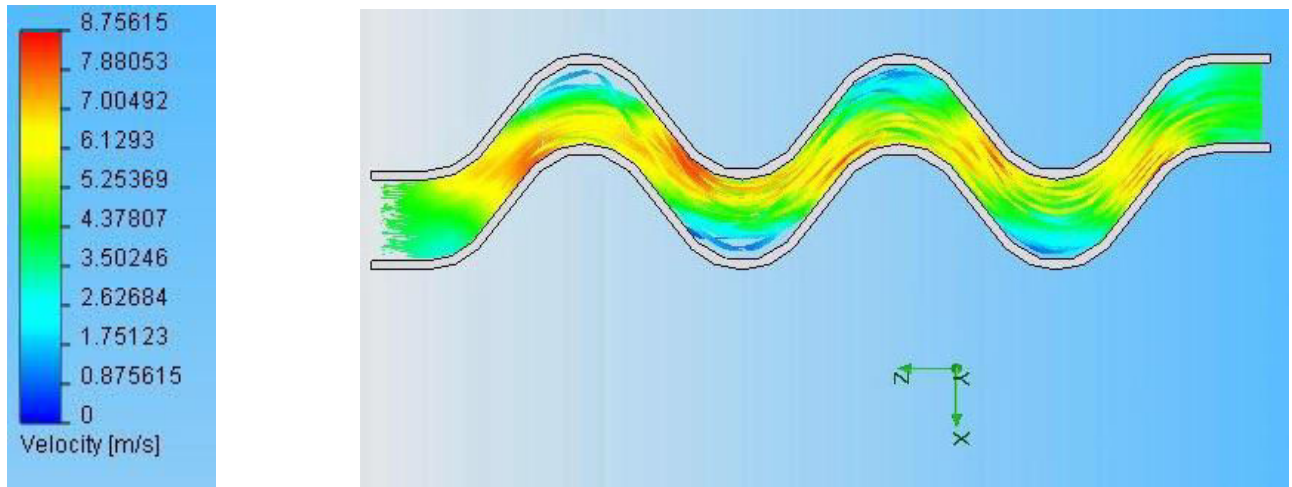


Рисунок 3.12 – Визуализация результатов моделирования двухмерного течения потока природного газа по криволинейному сепарационному каналу жалюзийного элемента. Изменение поля скоростей

Получив вид поля скоростей, можно увидеть, что во впадинах жалюзи скорость почти равняется нулю, то есть при использовании данной конструкции нужна гофра несколько другой формы, чтобы поток заполнял вся поперечное сечение. С увеличением количества гофр поле скоростей постепенно выравнивается, то есть при использовании достаточно большого их количества можно получить ламинарный режим течения потока, что приведет к значительному снижению эффективности работы элемента.

В ходе получения результатов распределения поля давления видим, что постепенно значение локальных давлений почти выравнивается по всему сечению. Но, проанализировав полученные данные, мы выяснили, что при

набегании потока нагофру образовывается зона повышенного давления, а после ее огибания с другой стороны – зона пониженного давления (рисунок 3.13). Это дает возможность улучшить геометрию элемента, а также повысить эффективность его работы. Анализируя векторные изображенные локальные скорости, можно увидеть, как они меняются при движении потока на каждом отрезке, что дает возможность построить изолинии одинаковых скоростей.

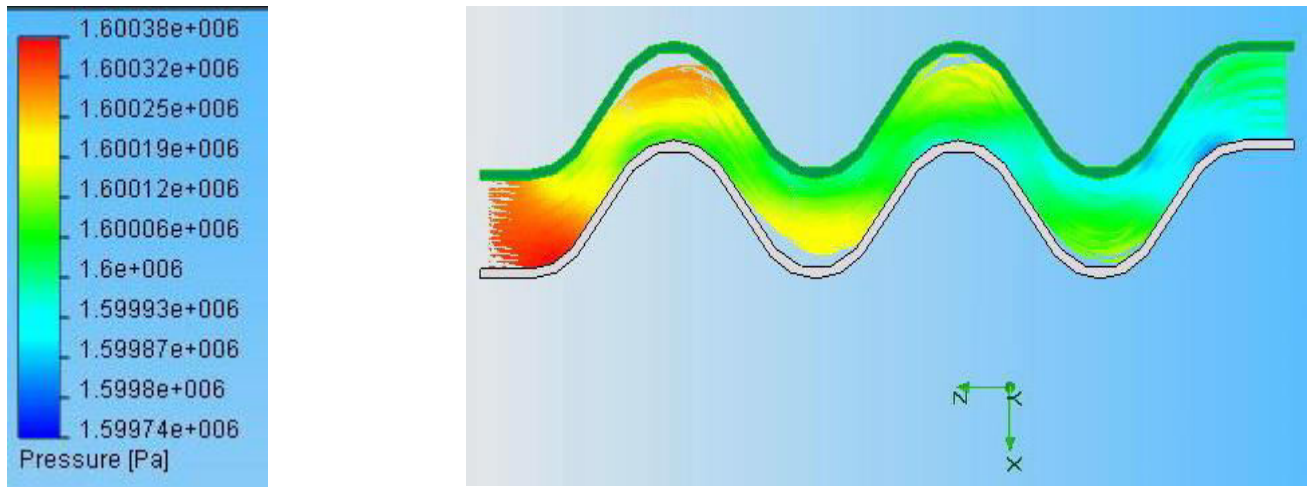


Рисунок 3.13 – Визуализация поля давлений по всему сечению жалюзи

При такой задаче скоростей движения можно более тщательно рассмотреть зоны вихреобразования и аномального поведения потока. Если это имеет место, вносим изменения в геометрию и более рационально проектируем канал для выбора места расположения фильтрующего элемента с последующим исследованием канала с фильтрующими вставками. Зоны вихреобразования показаны на рисунке с изотопами [56]:

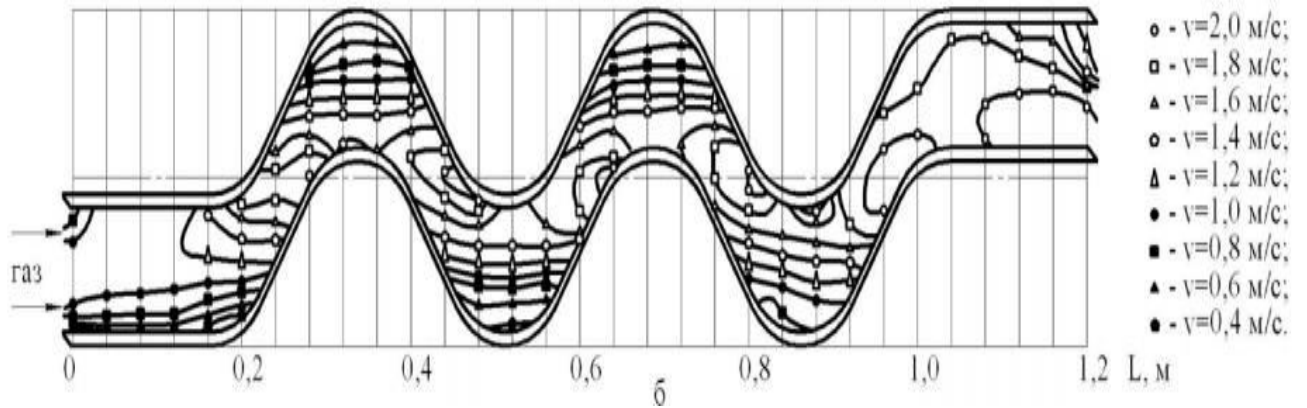
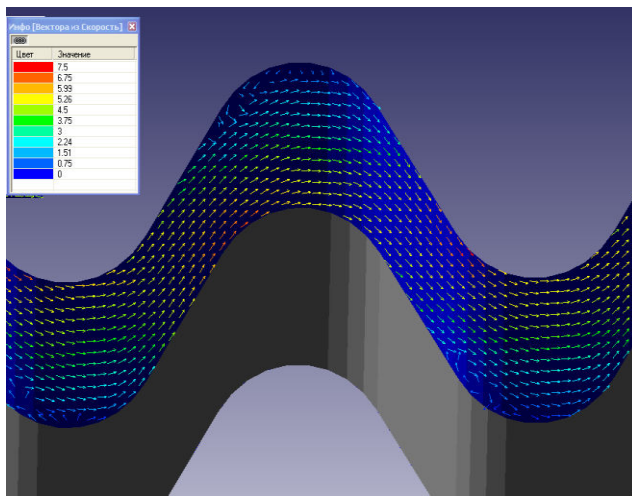
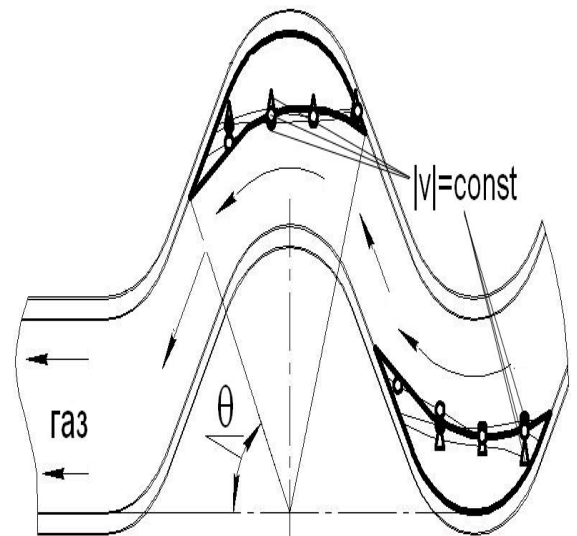


Рисунок 3.14 – Распределение скоростей в криволинейном канале инерционно-фильтрующего сепаратора



а

Рисунок 3.15 – Визуализация векторного показания направления локальных скоростей, а также изолиний скоростей (а);



б

графическое профилирование поперечного сечения фильтрующего элемента в области гофры [56] (б)

Полученные результаты обработаны в массивы данных, которые характеризуют изменение скорости газа при изменении геометрии канала (радиус гофры, прямолинейный участок, угол раскрытия).

Проведенное моделирование сделано на основе выбранной стандартной математической модели.

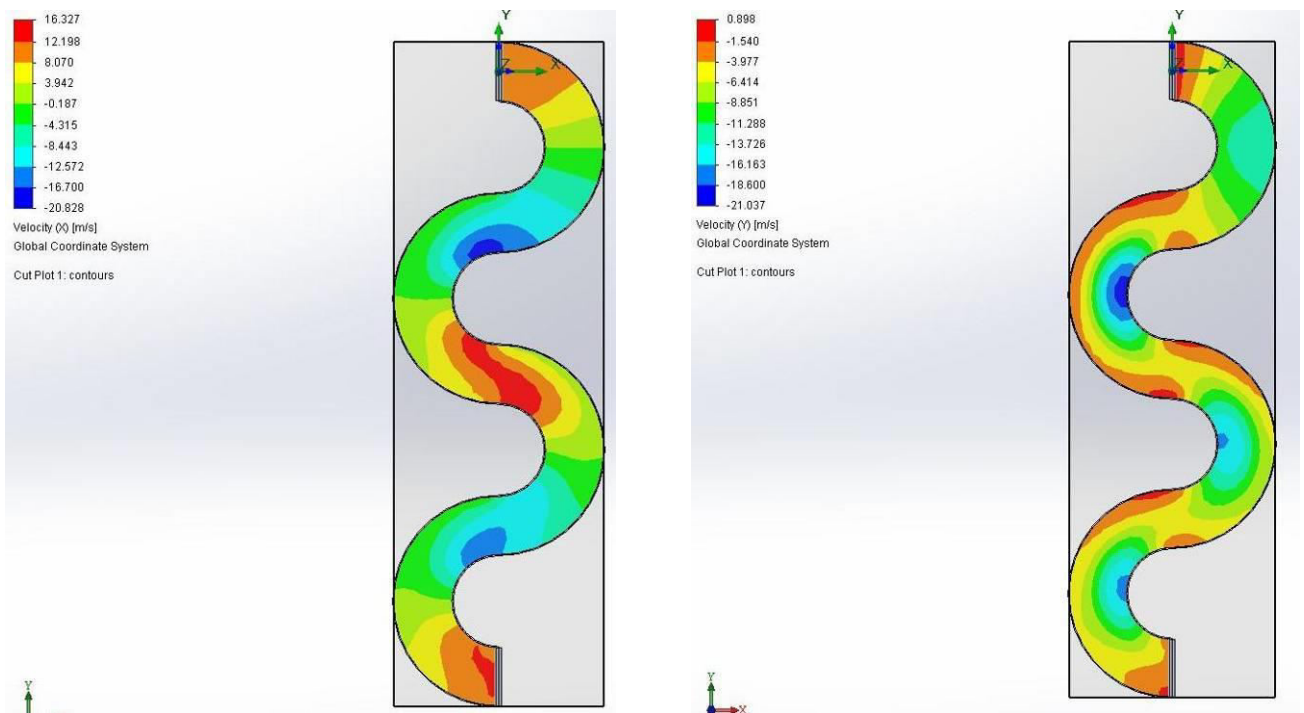


Рисунок 3.16 – Моделирование течения газа на всем канале инерционно-фильтрующего элемента

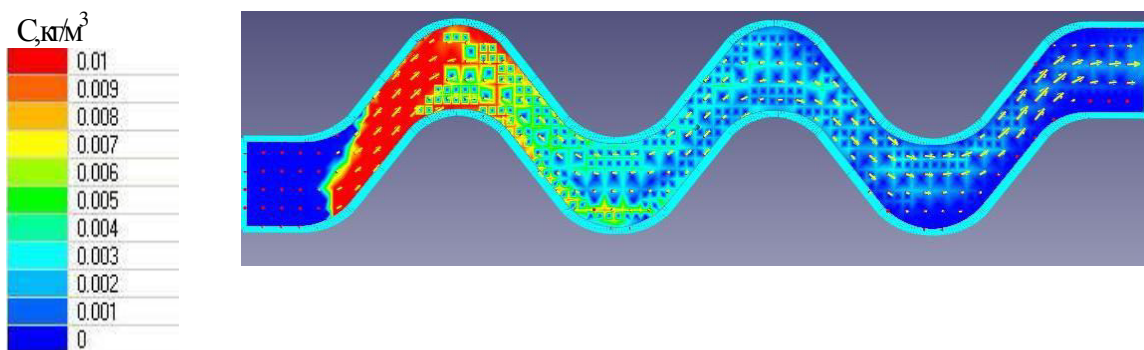
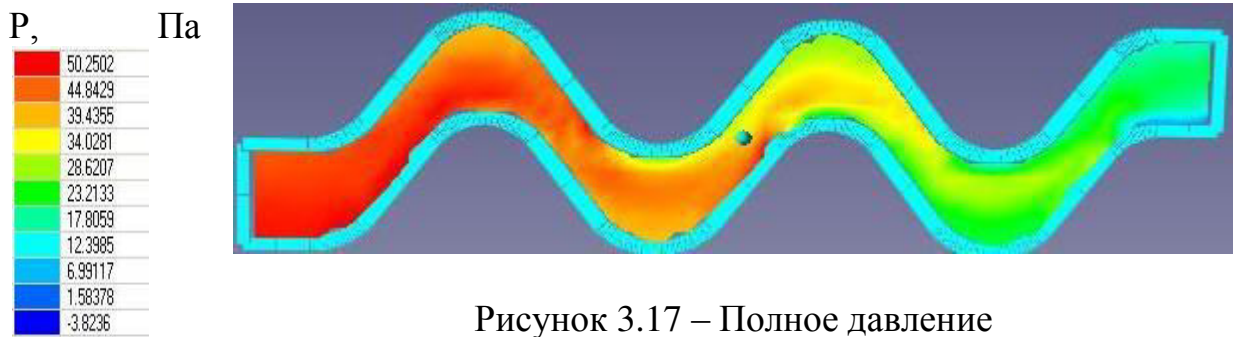
В зависимости от типа движения выбрана так называемая модель, то есть набор уравнений, которыми описывается движение газа. Существенным образом дозвуковое движение газового потока описывается выбранной математической моделью, предназначенной для моделирования течения газа (жидкости) при значительных ($Re > 10000$) (турбулентных) числах Рейнольдса и при малых

изменениях плотности. Задачи определялись для развитого турбулентного течения, в котором решаются только уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости и уравнения переноса для турбулентной энергии и диссипации [51].

В результате моделирования движения газок капельного потока в программе FlowVision получены результаты при таких исходных данных, которые были исходными при физическом моделировании:

- начальная скорость капель в канале 7м/с;
- распределение капель в канале (логнормальное);
- концентрация жидкости в газе 0,01 кг/м³;
- газ – воздух, жидкость – вода.

Результатом компьютерного исследования является комплексное моделирование всего канала, необходимое для рассмотрения взаимного влияния гофр друг на друга (вихреобразование и отвод жидкости).



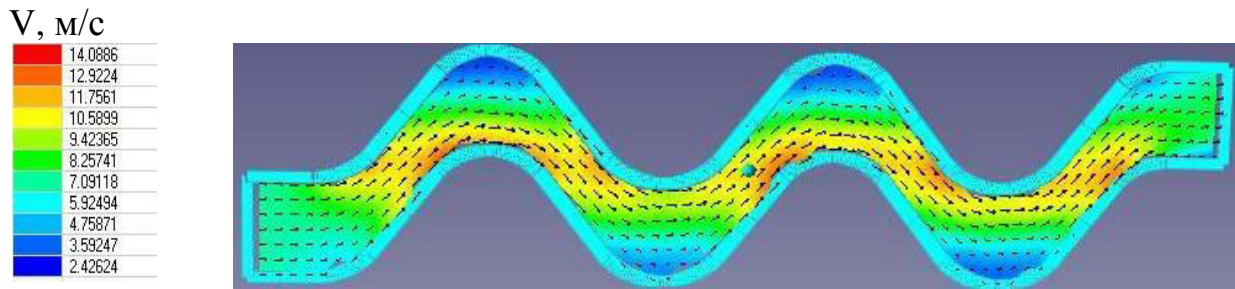


Рисунок 3.19 – Скорость газа

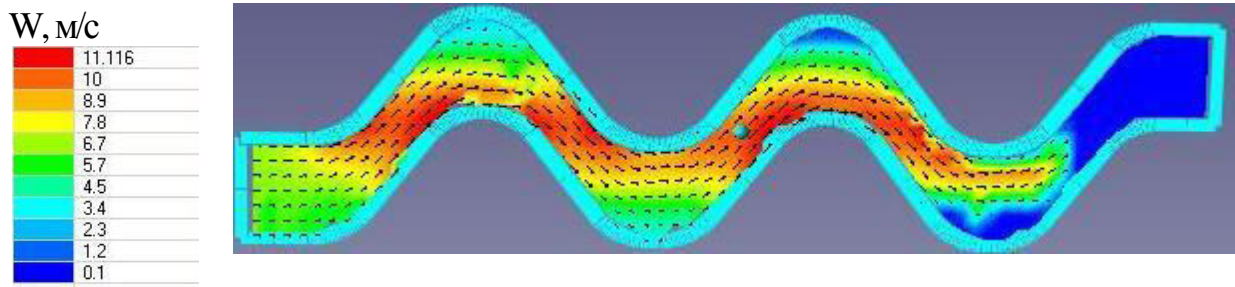


Рисунок 3.20 – Скорость капель

Сравнение результатов компьютерного моделирования и расчета по математической модели (аналитическое решение).

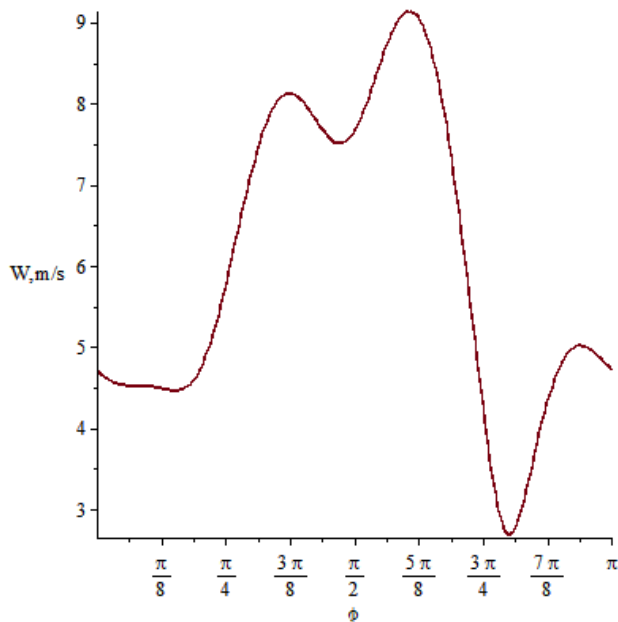


Рисунок 3.21 – График изменения абсолютной скорости капли по математической модели, при $r=0,14$ м



Рисунок 3.22 – График изменения абсолютной скорости капли по результатам компьютерного моделирования при $r=0,14$ м

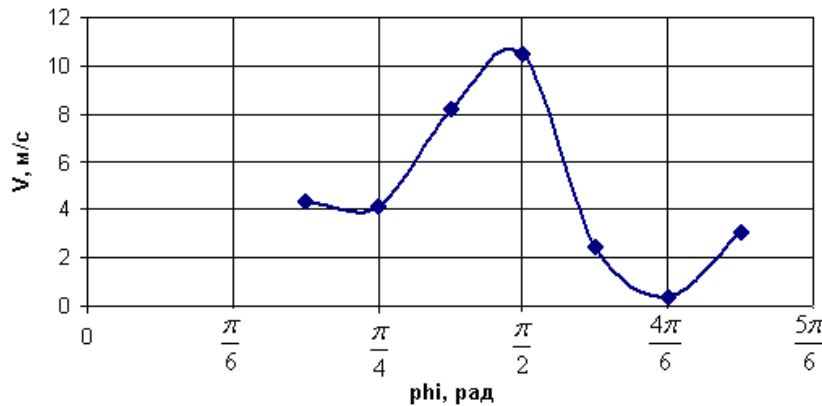


Рисунок 3.23 – График изменения общей скорости в эксперименте при $r=0,14$ м

Все полученные графики помогают проверить адекватность разработанной математической модели (рис 3.20) и сравнить результаты компьютерного моделирования (3.21) и экспериментальных исследований (3.22).

Выводы к разделу 3

1. Разработаны и изготовлены модельные экспериментальные образцы сепарационных устройств с соблюдением основных принципов физического подобия, что соответствует основным положениям теории подобия.

2. Разработаны и изготовлены экспериментальный стенд, позволяющий провести многофакторный эксперимент, варьируя как геометрическими параметрами криволинейных сепарационных каналов с фильтрующими элементами, так и режимными.

3. Разработано методика проведения экспериментальных исследований для определения распределения полей скоростей и давлений при движении газокапельных потоков в модельных образцах криволинейных инерционно-фильтрующих сепарационных каналов, а также предложен метод оценки погрешности обработки результатов.

4. Моделирование двухфазного течения газового потока в канале инерционно-фильтрующего сепаратора выполнено численным методом вычислительной гидродинамики, что в результате позволило выявить вероятные зоны потенциального вихреобразования на криволинейных участках.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах [81,118,125,126,127,137].

РАЗДЕЛ 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Основные сепарационные характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов

Основные сепарационные характеристики данного вида газосепараторов – это гидравлическое сопротивление, эффективность разделения газожидкостной смеси и максимально возможное содержание жидкости в газе, которая может быть удалена инерционно-фильтрующим газосепаратором.

В процессе исследования работы опытного образца было обнаружено малое гидравлическое сопротивление аппарата до 300 Па (рисунок 4.1).

Высокая эффективность работы при наличии 4 гофр в канале, хотя математические расчеты показывают, что необходимо лишь 2-3 (раздел 2, п. 2.5).

Содержание жидкости, которая эффективно улавливается и отводится (до 200 г/м^3), подтверждается графиками, представленными далее по тексту работы, там же – подробные результаты и графические зависимости.

4.1.1. Гидродинамические режимы работы инерционно-фильтрующих сепараторов и их влияние на эффективность процесса сепарации

При разработке математического описания процесса и подтверждения его адекватности необходимо иметь набор экспериментальных данных для задания граничных и начальных условий, выявления границ применения полученных математических формул. Проведенный литературный обзор работ [78-115], связанных с описанием гидродинамики в криволинейных каналах, показал, что одним из сложных вопросов является определение гидравлического сопротивления и эффективности работы оборудования, а также нахождения границы оптимальности значений этих параметров.

Для определения оптимального соотношения, которое покажет максимальную эффективность при минимальном гидравлическом сопротивлении, был изготовлен стенд для исследования движения газожидкостных потоков. При этом изменялась нагрузка по газу и определялось гидравлическое сопротивление на сухом аппарате.

Следующим этапом стало изучение изменения гидравлического сопротивления инерционно-фильтрующего элемента и эффективности разделения газожидкостной смеси. Процесс исследования происходит на двухфазной системе – воздух – вода. В ходе исследования проведены эксперименты при различной нагрузке по жидкости: 100 г/м^3 , 200 г/м^3 , 300 г/м^3 . Влияние этого параметра на гидравлическое сопротивление и эффективность получено в виде графических зависимостей. С помощью критериальных уравнений можно перенести результаты этих исследований на систему природный газ – нефть согласно теории подобия. Все полученные экспериментальные данные обработаны с применением математических методов, подтверждающих адекватность полученных результатов и дающих возможность определить погрешности проводимых исследований.

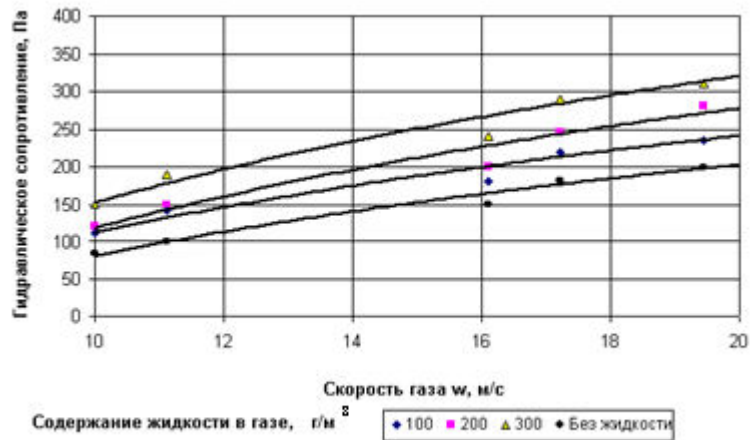


Рисунок 4.1– Результаты исследования гидравлического сопротивления инерционно-фильтрующего элемента от скорости газа на входе

Полученная графическая зависимость показывает, что при добавлении жидкости в поток и увеличении ее массового количества происходит увеличение гидравлического сопротивления, сохраняясь на уровне до 350 Па.

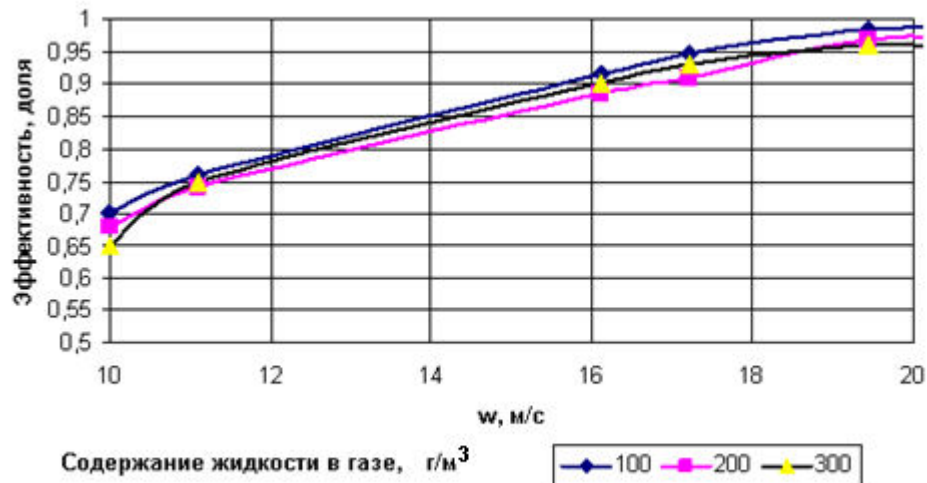


Рисунок 4.2 – Исследование эффективности разделения при различных скоростях и содержаниях жидкой фазы

Полученные данные показывают, что при скорости в 18-20 м/с достигается высокая степень разделения (на уровне 98-99%), и дальнейшее увеличение скорости движения приведет только к увеличению гидравлического сопротивления.

Результатом данной работы является разработка методики определения оптимального гидродинамического режима, при котором достигается оптимальное соотношение между гидравлическим сопротивлением и эффективностью разделения газожидкостной смеси.

Данные исследования позволили получить рекомендации для проектирования инерционно-фильтрующего оборудования на различных газожидкостных системах: нефть – вода; природный газ – нефть; воздух– нефть

других системах, а весь пересчет будет происходить при сохранении режимов течения (числа Рейнольдса).

4.1.2. Сравнение характеристик различных сепарационных устройств

При исследовании работы инерционно-фильтрующей элемента получены данные относительно эффективности и гидравлического сопротивления. Для сравнения использованы литературные данные по гравитационному, инерционному и фильтрующему газосепараторам [78].

Таблица 4.1

Сравнение сепарационных характеристик различных сепарационных устройств

Параметр	Гравитационный	Инерционный, жалюзийный	Фильтрующий	Инерционно-фильтрующий
Эффективность, %	до 80	70-95	98-99,99	до 99,9
Скорость движения потока, м/с	до 0,1	3-5	0,05-2,5	до 20
Гидравлическое сопротивление, Па	до 1000	100-500	до 2500	до 300
Удельная производительность, L/G	до 0,5	до 0,1	до 0,005	до 0,03

Полученные данные показывают, что инерционно-фильтрующий газосепаратор работает при незначительных содержаниях жидкости ($L/G= 0,03$), но при этом имеет большую эффективность, чем чисто инерционные аппараты и намного меньшее гидравлическое сопротивление, чем чисто фильтрующие аппараты.

4.2.Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований

При зондировании канала получен ряд данных по составляющим скорости газового потока в каждой гофре. Пример распределения этих скоростей приведен на рисунке 4.3.

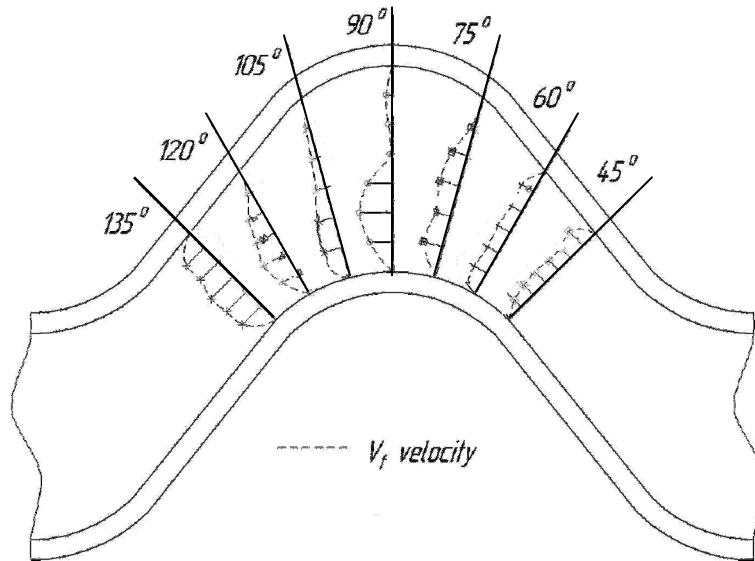


Рисунок 4.3 – График изменения составляющей скорости V_f в пределах одной из гофр

Для проведения расчета траектории движения необходимо подобрать математические выражения, которые описывают зависимости составляющих скорости газа (V_x и V_y) от геометрических размеров канала.

Также авторами работы [77] предпринята попытка выдачи начальных условий для расчета траектории капли, но, как показал дальнейший расчет, зависимость 2-й степени от координат X, Y не дает необходимой точности, поэтому сделано предположение об увеличении степени полинома до 6.

Для выявления особенностей работы оборудования на различных режимах в процессе проведения экспериментов изменялись геометрические параметры: радиус гофры, угол раскрытия гофры и длина прямолинейного

участка. Теоретическое описание процессов, происходящих при изменениях геометрии, дано в работе [77].

Диапазон изменения параметров: нагрузка по газу 0,2-0,306 м³/с; L=100, 150, 200 мм; R=25, 55, 100 мм; $\alpha=60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}$; расстояние между гофрами - 100 мм.

Методика обработки результатов экспериментальных замеров показана в разделе 3.3 и, как результат, линия тренда через аппроксимированные данные описывается полиномом 6-й степени. Полученная зависимость дает возможность определить теоретическую скорость на основе обработки экспериментальных данных, но в работе разработана отдельная математическая модель на основе классических уравнений гидродинамики, которая показала свою адекватность, поэтому далее приводим результаты экспериментальных замеров, обработанных в программе Excel, и результаты математического моделирования на основе математической модели.

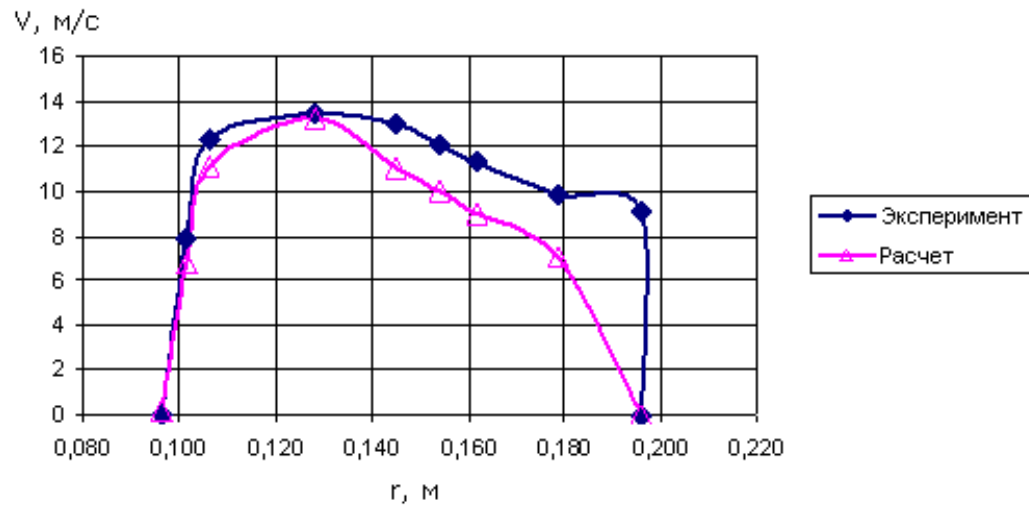
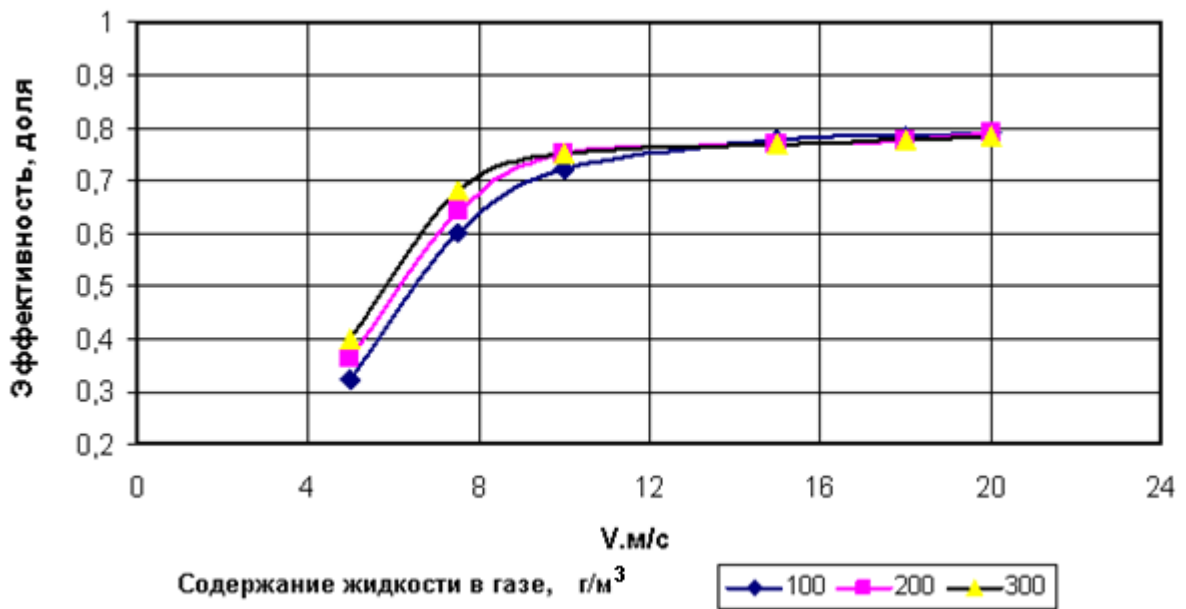


Рисунок 4.4 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений скорости газа в канале инерционно-фильтрующего сепаратора, при R=55 мм, L=200 мм, $\alpha=120^{\circ}$; ширина канала – 100 мм. Расход газа Q=0,106 м³/с

В результате проведения расчетов получены функциональные зависимости для определения скорости газа в канале инерционно-фильтрующая газосепарационного элемента, что позволяет рассчитать скорость капель и их траекторию. Это дает возможность определить место оптимального расположения фильтрующего элемента.

После исследования работы элемента без фильтра и с фильтром был рассмотрен образец инерционно-фильтрующего оборудования и определены в нем поля скоростей.

Далее представлены результаты исследования смеси воздух-вода при различных скоростях газа и геометрических размерах.



а

Рисунок 4.5 – Эффективность разделения газожидкостной смеси в инерционно-фильтрующем газосепараторе при оптимальных геометрических размерах:
 а – $R = 25$ мм, $L = 200$, $\alpha = 90^0$; б – $R = 55$ мм, $L = 200$, $\alpha = 90^0$

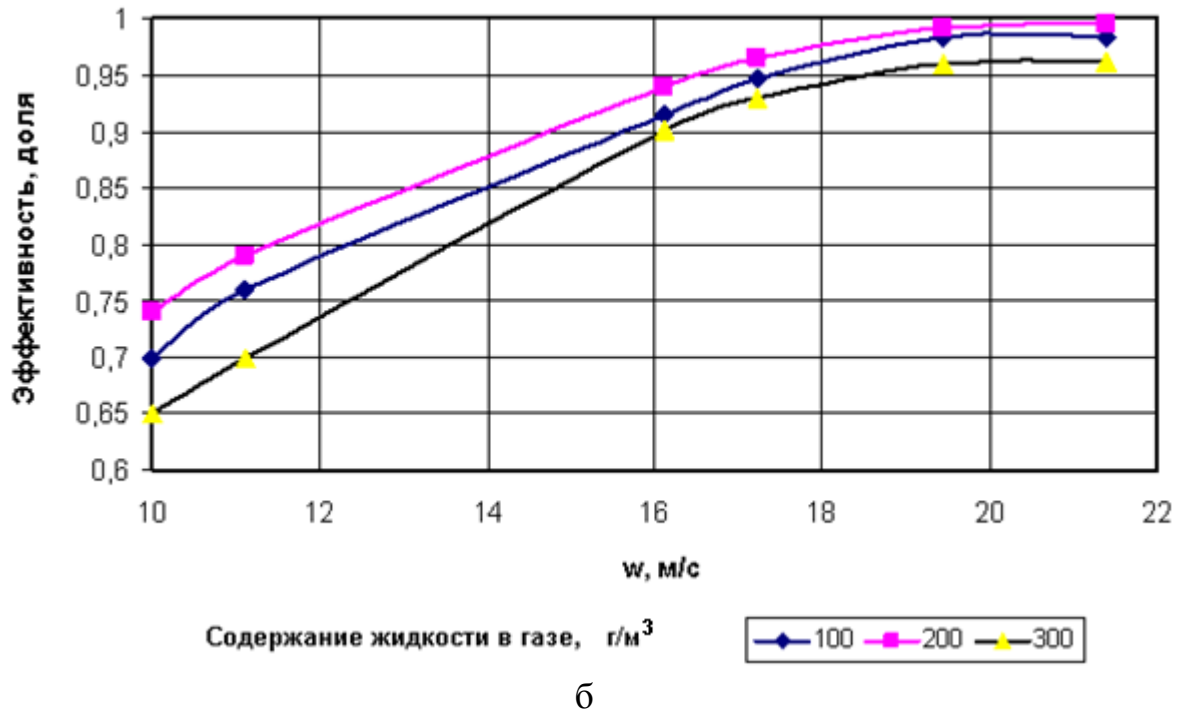
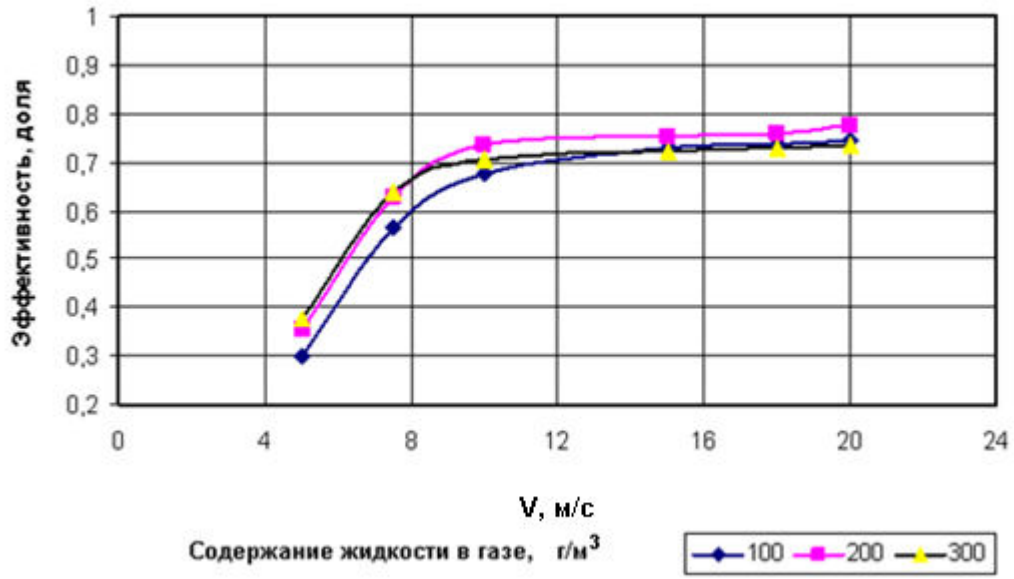


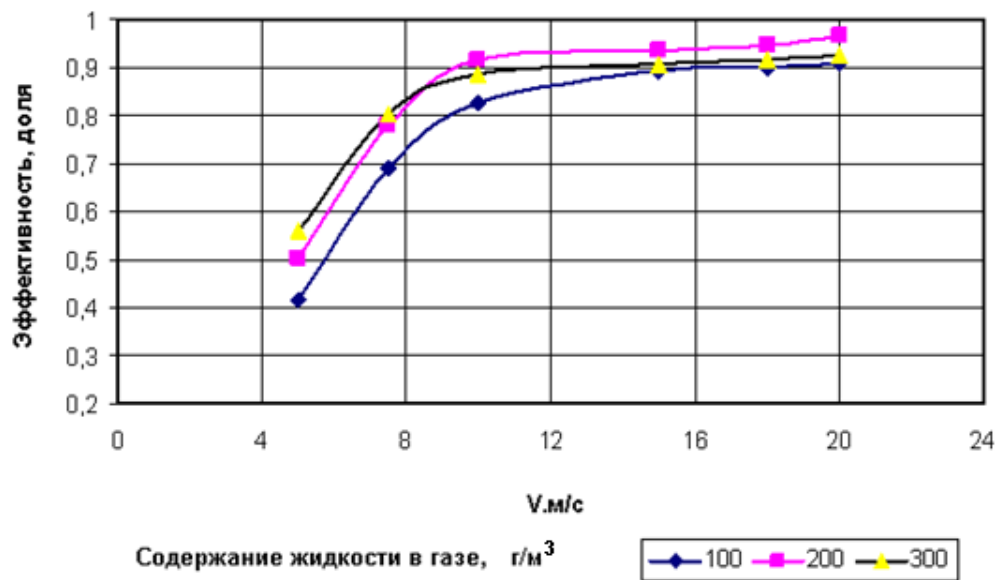
Рисунок 4.5, – лист 2

Оптимальность данных параметров подтверждается минимальным гидравлическим сопротивлением всего аппарата, а также максимальной эффективностью разделения газожидкостной смеси, изображенной на графических зависимостях.

При визуальном наблюдении не идет срыв пленки с внутренней части жалюзи, она плавно перемещается по стенке канала и стекает в фильтр. При данных параметрах скорость газа может достигать 8-10 м/с, что подтверждено визуальным наблюдением.



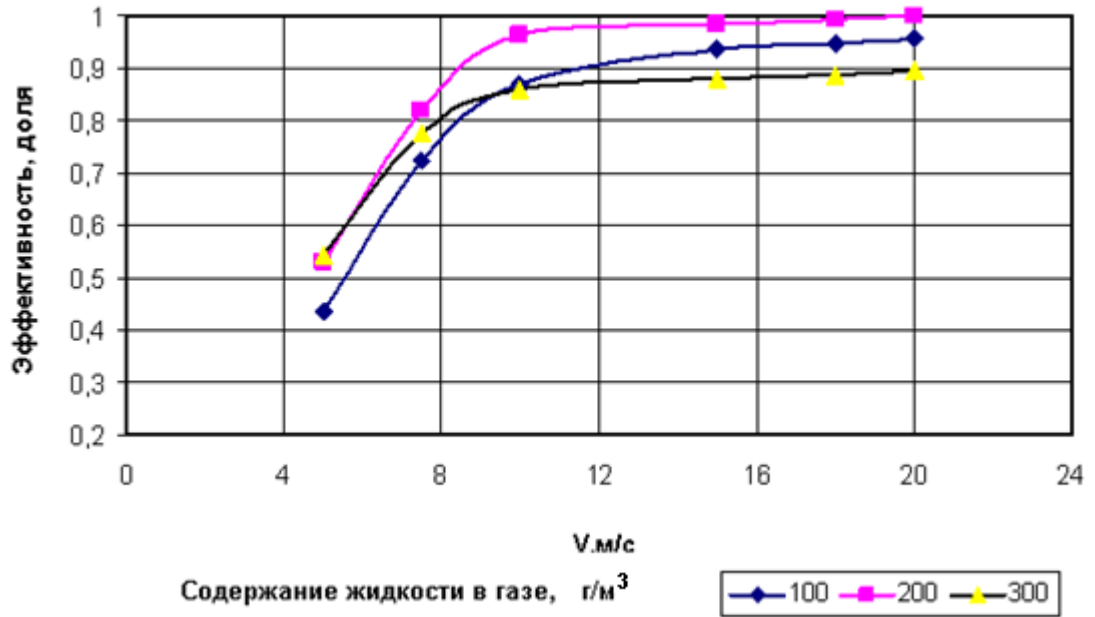
а



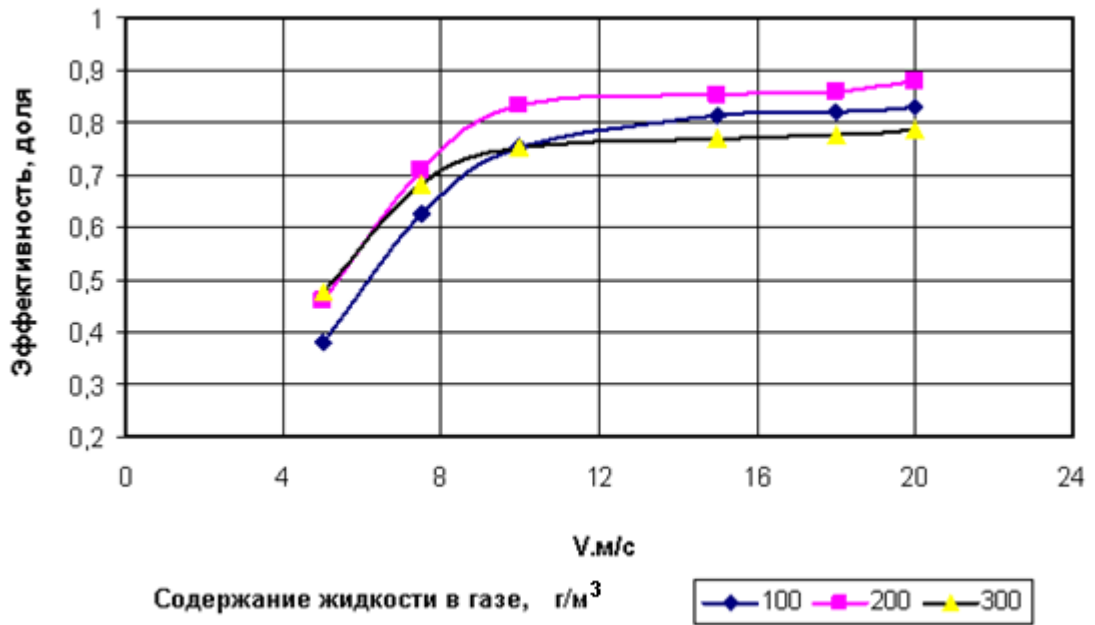
б

Рисунок 4.6 – Графики изменения эффективности разделения газожидкостного потока при различной скорости газового потока и при изменении геометрических параметров канала инерционно-фильтрующего сепаратора (радиус гофры R , длина прямолинейного участка L , угол раскрытия α):

а – $R = 100$ мм, $L = 200$, $\alpha = 90^0$; б – $R = 55$ мм, $L = 100$, $\alpha = 90^0$; в – $R = 55$ мм, $L = 150$, $\alpha = 90^0$; г – $R = 55$ мм, $L = 200$, $\alpha = 60^0$; д – $R = 55$ мм, $L = 200$, $\alpha = 120^0$

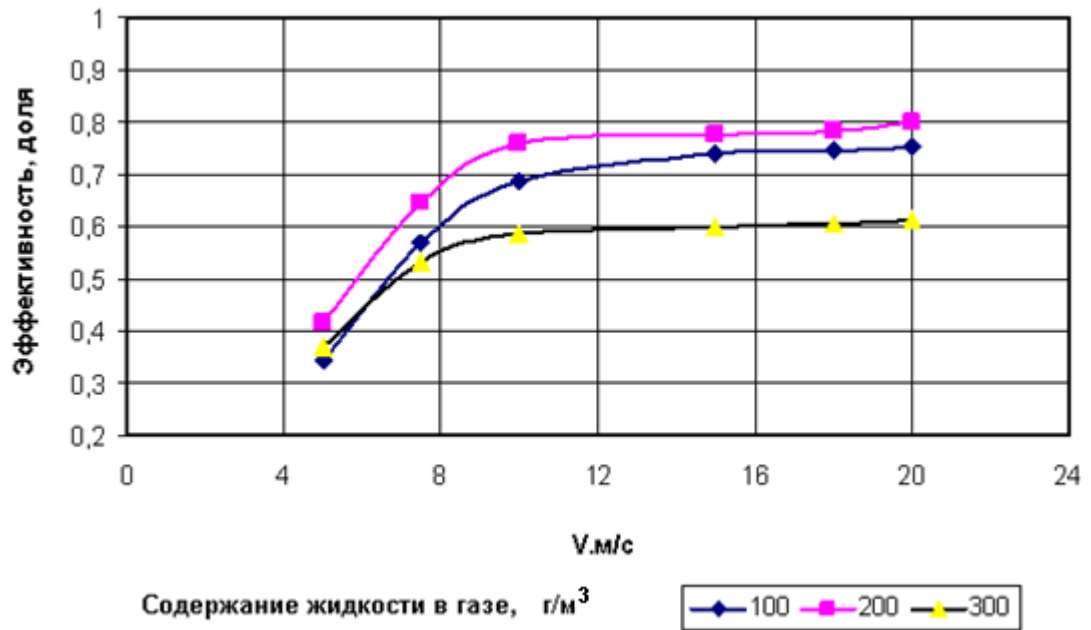


B



Г

Рисунок 4.6, – лист 2



Д

Рисунок 4.6, – лист 3

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований в виде графических зависимостей, показывающих поведение двухфазного потока при изменении геометрических размеров канала инерционно-фильтрующего газосепаратора.

Полученная графическая зависимость показывает, что при увеличении длины участка происходит увеличение эффективности, но на значении 200 мм график стабилизируется. Увеличение эффективности происходит за счет возможности реформирования потока и повторного его разделения на две зоны (более насыщенную жидкостью и менее насыщенную), поэтому оптимальной является длина 200 мм. Также видно, что при содержании жидкости 200 г/м³ происходит наибольшая эффективность разделения, что объясняется достаточностью влаги для осуществления процесса коагуляции, но недостаточностью для повышенного коэффициента дробления.

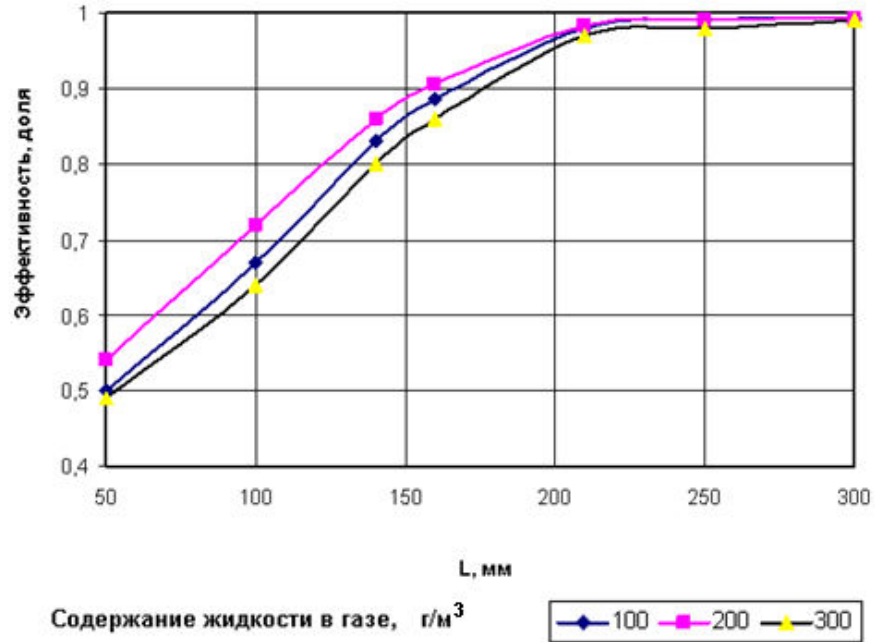


Рисунок 4.7 – Зависимость эффективности разделения газожидкостной смеси от длины прямолинейного участка

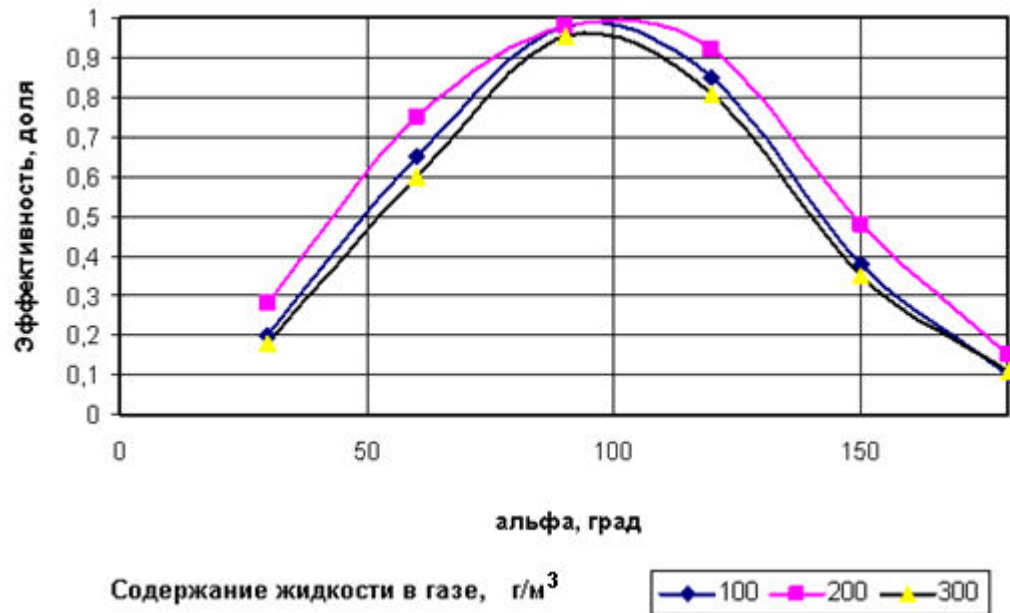


Рисунок 4.8 – Зависимость эффективности разделения смеси от угла раскрытия гофр

Представленный график имеет экстремум в точке 90° . Малая эффективность в начале может быть следствием вихреобразований и вторичного брызгоуноса. Падение эффективности после пика объясняется уменьшением центробежных сил, действующих на каплю, и уменьшением вероятности выхода ее из потока газа в тело фильтра.

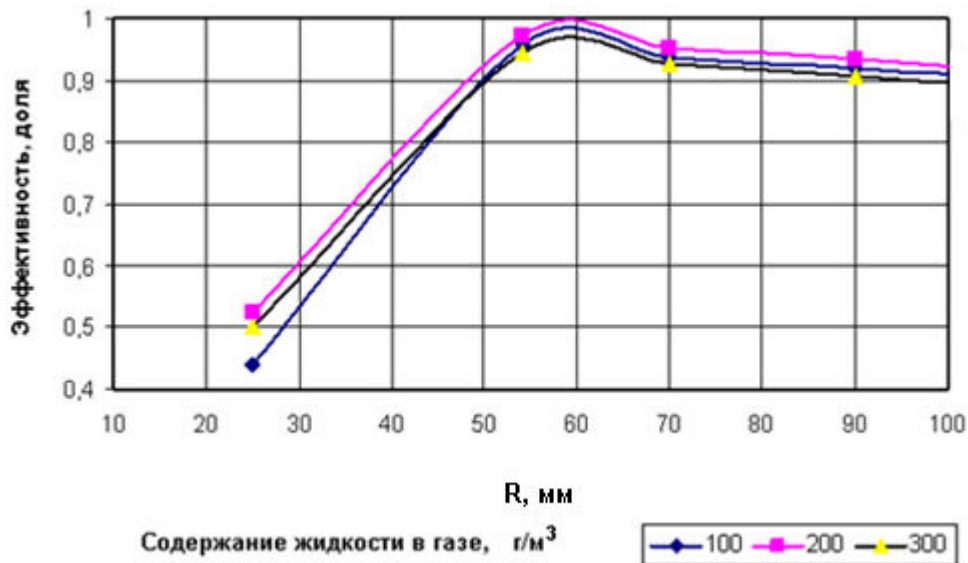
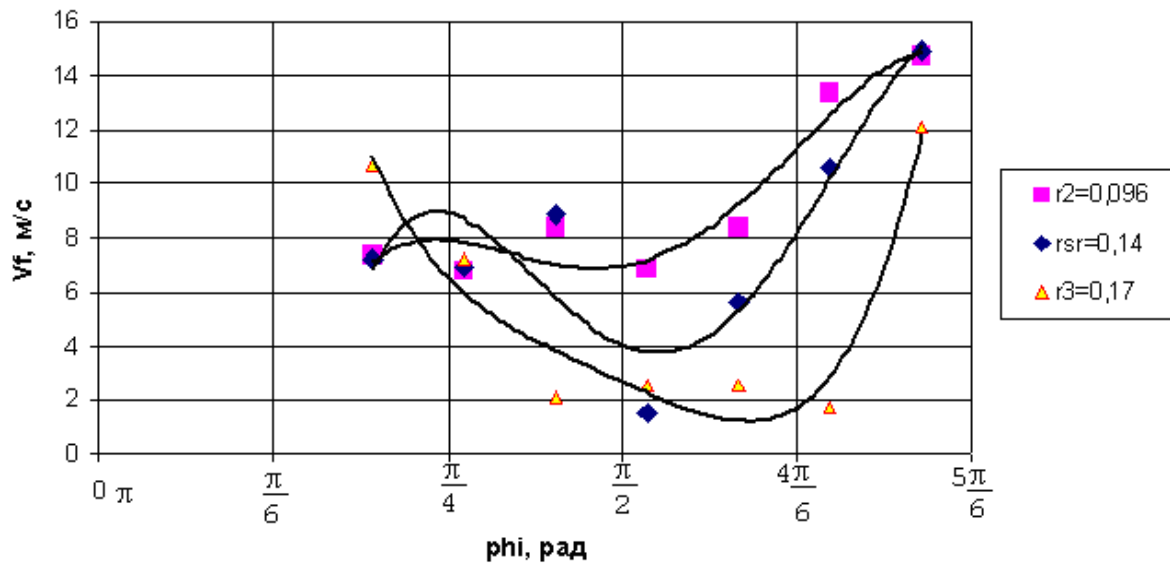


Рисунок 4.9 – Зависимость эффективности газосепарации от радиуса криволинейных участков

Вышеприведенный график иллюстрирует следующий вывод: повышение эффективности происходит до значения радиуса 58 мм и потом его рост уже незначителен, что подтверждается наличием вихрей, изображенных на рисунке 4.10. Анализируя данные, можно сделать вывод, что, исходя из экспериментальных замеров в диапазоне изменения геометрических размеров ($R=25, 55, 100$ мм; $L=100, 150, 200$ мм; $\alpha=60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}$), оптимальными параметрами являются $R = 55$ мм, $L = 200$, $\alpha = 90^{\circ}$, так как при данных параметрах эффективность разделения газожидкостной смеси является максимальной (на

уровне 99 %), и гидравлическое сопротивление на уровне 350 Па, что дает наименьшие энергетические затраты. Ниже приведены результаты замеров скорости газового потока по всем четырем гофрам канала.

1-я гофра



2-я гофра

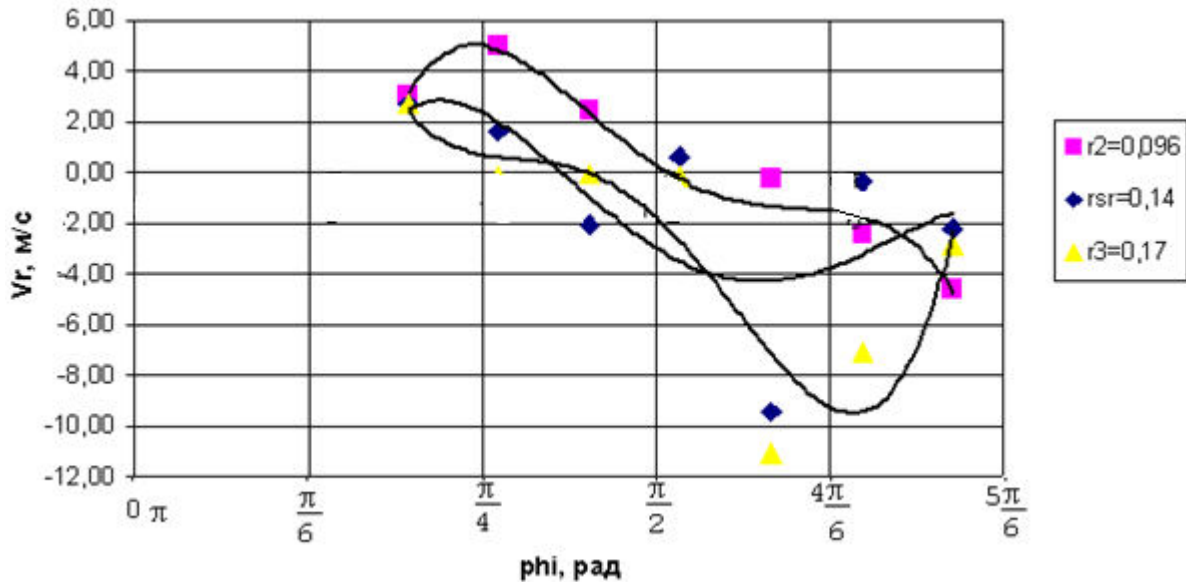
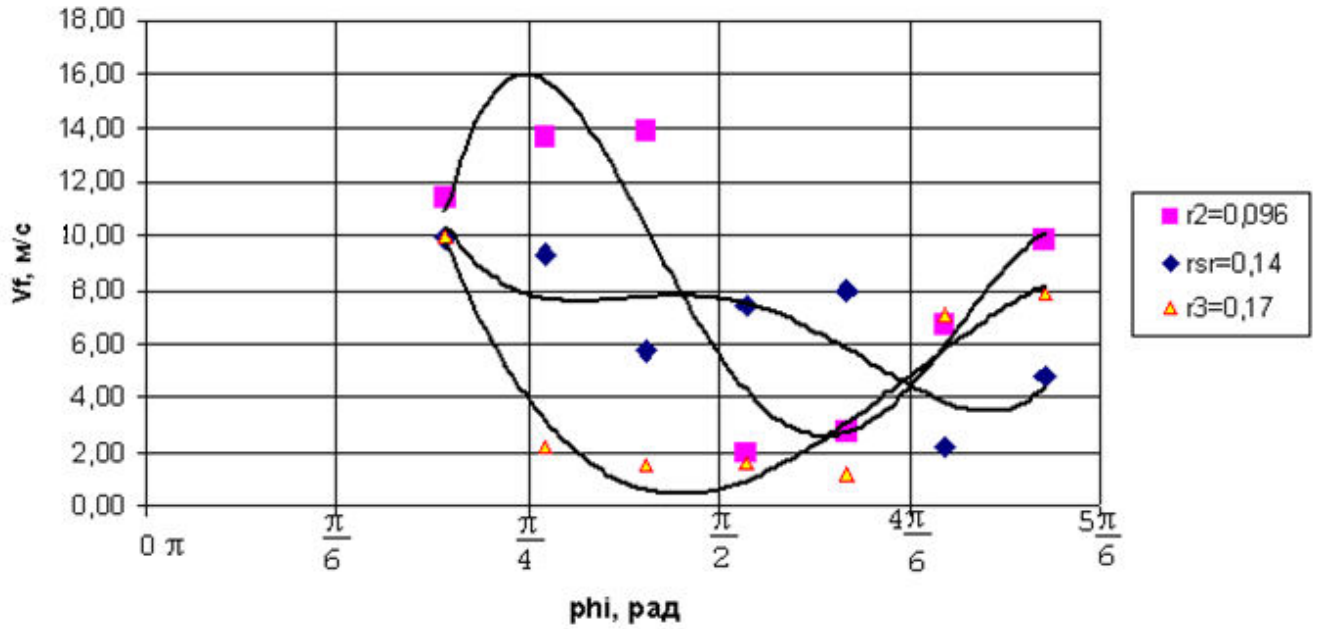


Рисунок 4.10 – Результаты экспериментальных замеров скорости газа в канале каждой гофры инерционно-фильтрующего сепаратора



3-я гофра

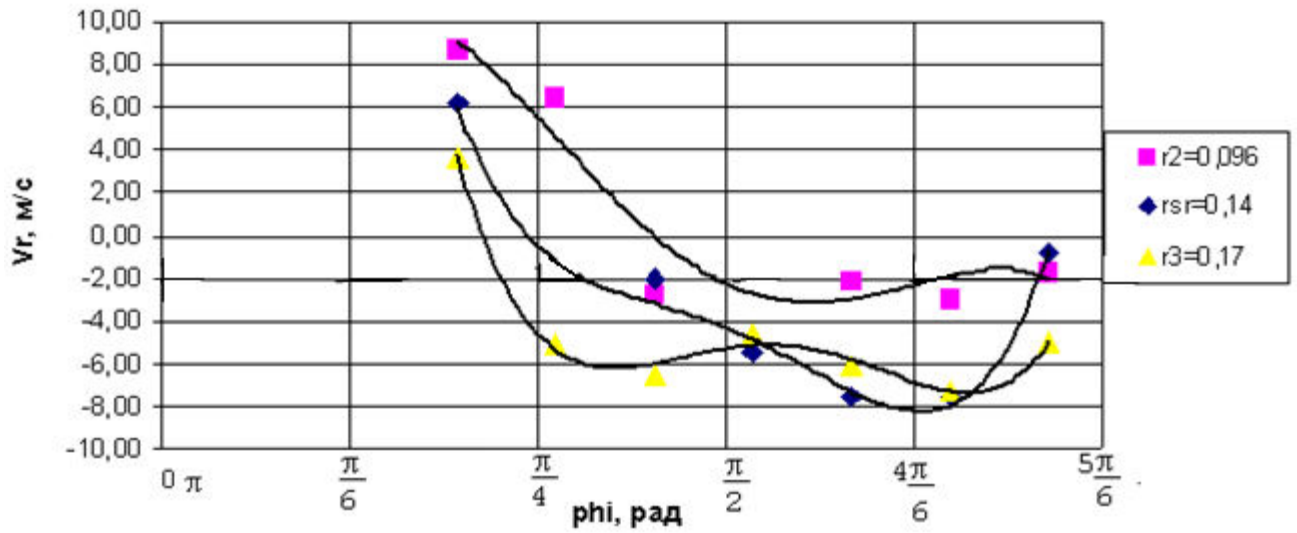
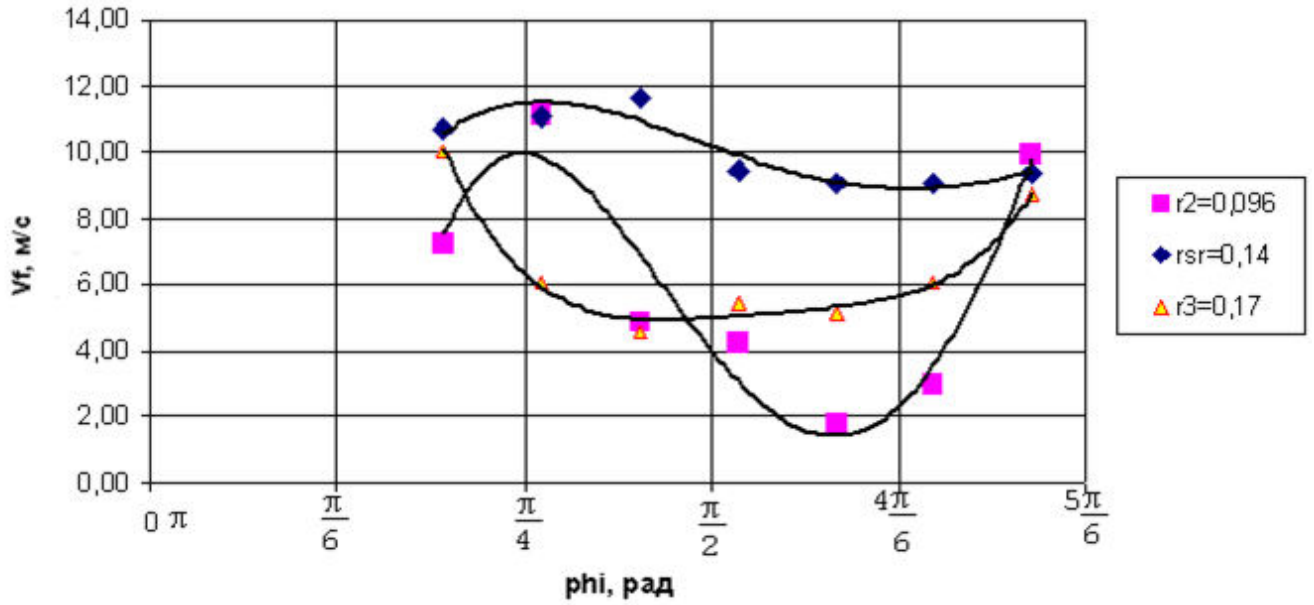


Рисунок 4.10, – лист 2



4-я гофра

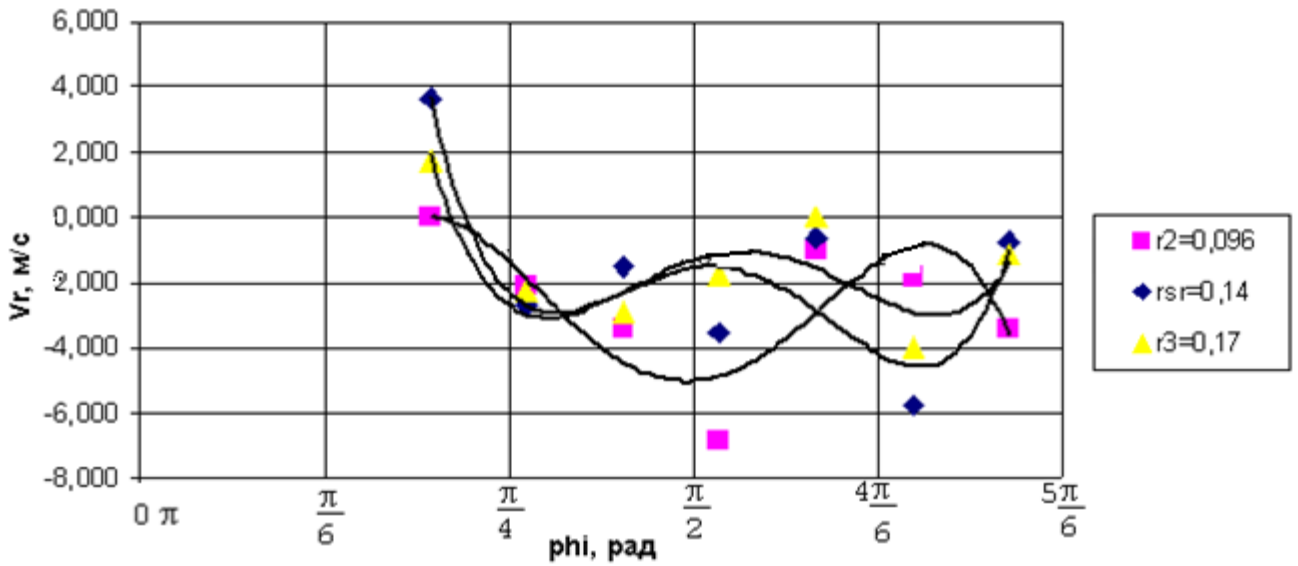


Рисунок 4.10, – лист 3

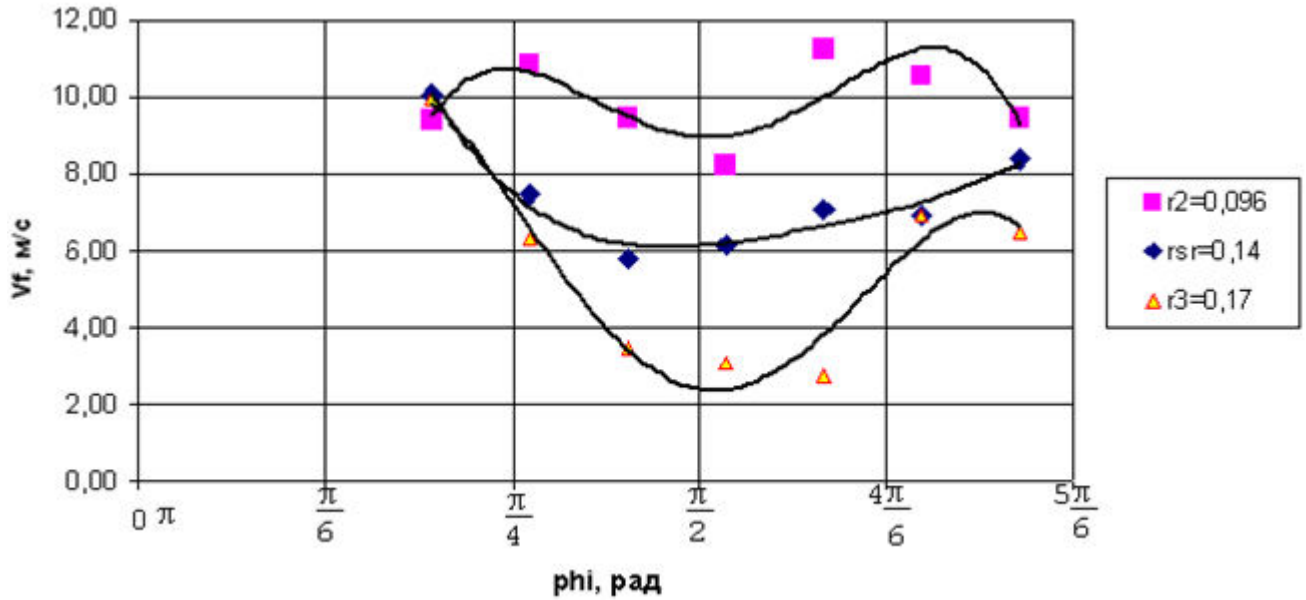


Рисунок 4.10, лист 3

Результаты замеров, составляющих скорости в первой гофре по сечениям, а остальные – в приложении Л.

Таблица 4.2

Радиальная составляющая скорости V_r для гофры 1

Номер замера	1 $\varphi=45^0$		2 $\varphi=60^0$		3 $\varphi=75^0$		4 $\varphi=90^0$		5 $\varphi=105^0$		6 $\varphi=120^0$		7 $\varphi=135^0$	
	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r	r	V_r
Сечение 1	0,096	11,64	0,096	11,8	0,096	11,8	0,096	0,01	0,096	9,43	0,096	0,86	0,096	0,01
Сечение 2	0,14	10,3	0,14	10,9	0,14	5,9	0,14	3,38	0,14	-6,67	0,14	6,12	0,14	-1,29
Сечение 3	0,17	5	0,17	3,37	0,17	0,77	0,17	-2,51	0,17	-2,51	0,17	-4,7	0,17	7

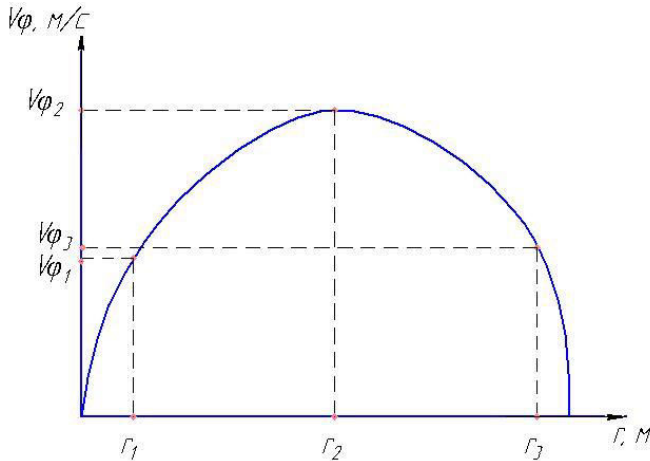
Таблица 4.3

Тангенциальная составляющая скорости V_{φ} для Гофры 1

Номер замера	1 $\varphi=45^{\circ}$		2 $\varphi=60$		3 $\varphi=75^{\circ}$		4 $\varphi=90^{\circ}$		5 $\varphi=105^{\circ}$		6 $\varphi=120^{\circ}$		7 $\varphi=135^{\circ}$	
	r	V_{φ}	r	V_{φ}	r	V_{φ}	r	V_{φ}	r	V_{φ}	r	V_{φ}	r	V_{φ}
Сечение 1	0,096	5,42	0,096	6,8	0,096	10,65	0,096	11,04	0,096	9,42	0,096	9,78	0,096	13,8
Сечение 2	0,14	8,63	0,14	7,64	0,14	10,2	0,14	12,6	0,14	5,61	0,14	10,6	0,14	14,9
Сечение 3	0,17	10,7	0,17	7,22	0,17	2,11	0,17	2,52	0,17	2,52	0,17	1,7	0,17	12,1

Вышеизложенная информация (поле распределения составляющих скорости газового потока) позволяет найти константы интегрирования для работы математической модели, так как ранее в разделе 2.1.2 была представлена задача определения неопределенных констант интегрирования ($_C1$, $_C2$, $_C3$), которые возможны после проведения экспериментов на опорных значениях при граничных условиях в определенном диапазоне. Их можно применять только в определенных диапазонах геометрических размеров канала инерционно-фильтрующего сепаратора при определенных гидродинамических значениях режима (при расходе газа и жидкости). Эти значения были использованы в разделе 2.1.2 при определении составляющих скорости газа.

Методика определения необходимых констант по значениям эксперимента приведена ниже.

Рисунок 4.11–Схема нахождения коэффициентов C по экспериментальным данным

Подставляем в общее выражение для составляющих скорости результаты эксперимента в любых трех характерных точках при координатах:

$$\begin{cases} V_{\varphi_1}(r_1, \varphi_1), \\ V_{\varphi_1}(r_2, \varphi_1), \\ V_{\varphi_1}(r_3, \varphi_1); \end{cases} \quad (4.1.)$$

$$\begin{cases} Vr_1(r_1, \varphi_1), \\ Vr_2(r_2, \varphi_1), \\ Vr_3(r_3, \varphi_1). \end{cases} \quad (4.2.)$$

В результате получаем систему для каждой составляющей скорости и находим коэффициенты при углах замера (45^0 , 60^0 , 75^0 , 90^0 , 105^0 , 120^0 , 135^0) по программе приложения Л.

Определение коэффициентов С из эксперимента для составляющих скорости газа, приведенных в табл. 4.4 и 4.5. Остальные результаты расчётов приведены в (Приложение К)

Таблица 4.4

Коэффициенты С для радиальной составляющей скорости

Номер замера	<u>C1</u>	<u>C2</u>	<u>C3</u>
1	1,75	-1,76	2,28
2	2,05	-2,03	2,5
3	1,92	-1,88	2,61
4	1,87	-1,933	2,96
5	1,65	-1,75	3,13
6	2.08	-2,01	2,853
7	1,72	-1,73	3,03
Среднее значение	1,862	-1,87	2,766

Таблица 4.5

Коэффициенты С для тангенциальной составляющей скорости

Номер замера	<u>C1</u>	<u>C2</u>	<u>C3</u>
1	2230	2225	3,06
2	2205	2224	2,27
3	2218	2211	3,5
4	2274	1882	3,94
5	2208	1900	3,19
6	2204	2696	2,96
7	2284	2129	2,94
Среднее значение	2213	2181	3,12

Ранее изложенная в разделе 2.1.2 задача предполагается нахождение зависимости константы интегрирования от числа Рейнольдса. Приведем пример полученных зависимостей для составляющих скорости.

Для примера для составляющей скорости V_r :

$$_C1:=0,000001 \cdot Re$$

$$_C2:=-0,000001 \cdot Re;$$

$$_C3:=0,0000007 \cdot Re.$$

Далее подставляем в общее выражение для скорости

$$V_r := \frac{r^2 _C1 \sin(2\phi) + r^2 _C2 \cos(2\phi) + C3}{r},$$

получаем выражение

$$V_r := \frac{-0,000001 r^2 \Re \sin(2\phi) + 0,000001 r^2 \Re \cos(2\phi) - 7,10^{-7} \Re}{r}.$$

Проводим такие же расчеты для тангенциальной составляющей скорости газа:

$$_C1:=0,0014 \cdot Re$$

$$_C2: = - 0,0013 \cdot Re;$$

$$_C3:=0,000002 \cdot Re.$$

Далее подставляем в общее выражение для скорости

$$Vf := r^2 _C1 \cos(2\phi) - C2 \sin(2\phi) + \sqrt{\frac{r^4 _C1^2 \cos(2\phi)^2 + r^4 _C1 \sin(2\phi)^2 + r^4 _C2 - _C3^2}{r}},$$

получаем выражение

$$Vf := 0,00002744 \Re \cos(2\varphi) + 0,00002548 \Re \sin(2\varphi) + (5,37824000010^{-9} \Re^2 \cos(2\varphi)^2 + 5,37824000010^{-9} \Re^2 \sin(2\varphi)^2 + 4,60878857210^{-9} \Re^2)^{1/2}.$$

4.3. Сравнение результатов экспериментальных измерений с результатами теоретических расчетов

При анализе графических зависимостей скорости газа, полученных с помощью математического моделирования и экспериментального исследования доказана адекватность разработанного теоретического метода и просчитаны границы применения существующей математической модели.

Ниже представлены результаты теоретических расчетов в первой гофре на различных радиусах движения газа по уравнениям, полученным при совместном решении уравнений Навье-Стокса и неразрывности.

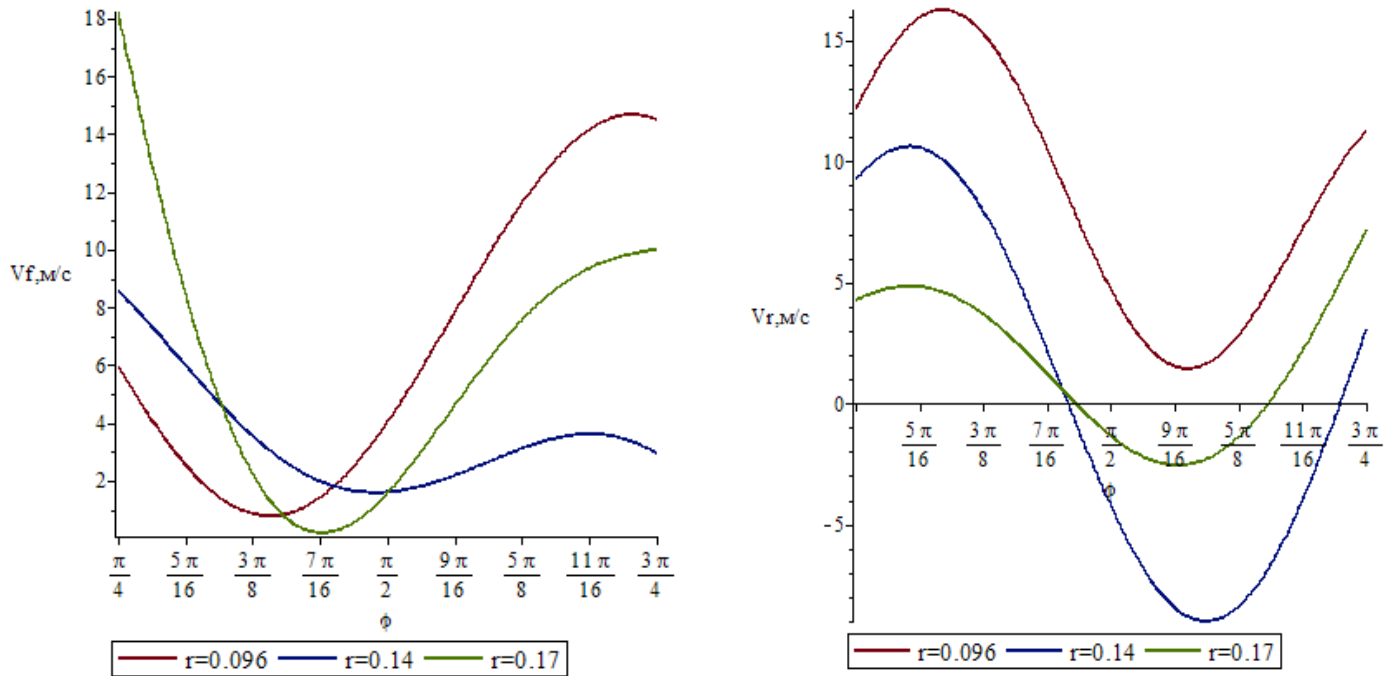


Рисунок 4.12 – Графики изменения составляющих скорости в первой гофре, при $Q=0.106 \text{ м}^3/\text{с}$

Для наглядности сравнения между теоретическими и практическими результатами приведем пример для среднего радиуса:

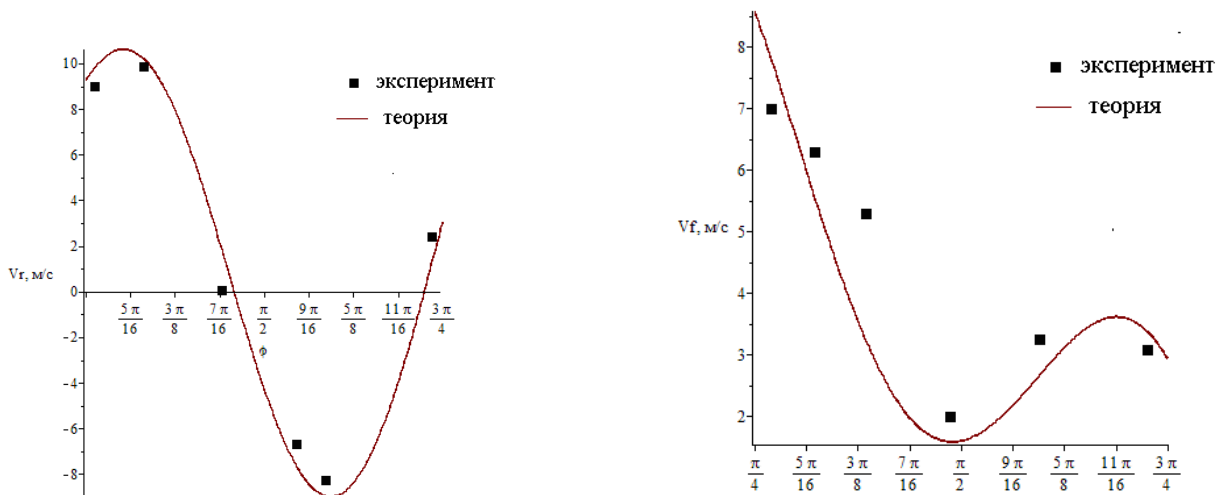


Рисунок 4.13 – Сравнение экспериментальных замеров скорости газа и результатов расчета

При сравнении полученных результатов теоретических исследований с практическим видно, что при приближении к стенке на минимальное расстояние скорость убывает плавно, как в математической модели, что иллюстрируется приведенными графиками (на внутренней стенке наибольшие скорости, а на внешней – наименьшие).

Также наличие турбулентных вихревых течений ($Re > 10000$) обуславливает наличие двух пиков скорости. А при расчете теоретическим методом он всегда один. Также смещение пика скорости близко к стенке может вызывать срыв пленки уловленной жидкости. С этой точки зрения и предложены рекомендации к гидродинамическому профилированию сепарационного канала.

Сравнивая полученные результаты, можно сказать, что разработанный математический метод расчета может быть использован для создания инженерной методики расчета инерционно-фильтрующих газосепараторов. Ниже представлено сравнение результатов экспериментальных исследований и теоретического расчета эффективности улавливания капель размером от 0 до 50 мкм

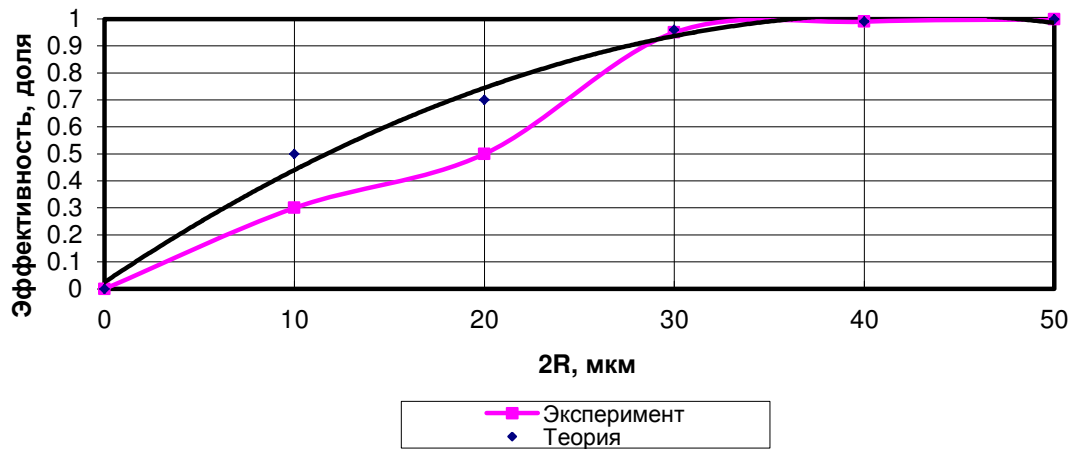


Рисунок 4.14 – Сравнение расчетной эффективности разделения и экспериментальных данных. Содержание жидкости в газе 200 мг/м^3

Выводы к разделу 4

1. Экспериментально исследован характер распределения полей локальных скоростей движения для газового потока в модельных образцах криволинейных инерционно-фильтрующих сепарационных каналов в области устойчивого турбулентного режима движения ($Re > 10000$).

2. Установлено, что содержание жидкости в потоке газа до 300 г/м^3 незначительно влияет на потери динамического напора в криволинейных каналах инерционно-фильтрующих сепараторов, гидравлическое сопротивление которых по сравнению с фильтрами незначительно сопоставимо по значению с инерционными сепараторами и составляет до 350 Па.

3. Выявлено, что для эффективного разделения газок капельных потоков в инерционно-фильтрующих сепараторах оптимальный диапазон рабочих скоростей газового потока находится в пределах 10-20 м/с.

4. Экспериментально определены оптимальные геометрические размеры и конфигурация криволинейных инерционно-фильтрующих сепарационных каналов из условия обеспечения максимального значения эффективности сепарации и минимального значения гидравлического сопротивления.

5. Отмечено, что инерционно-фильтрующие газосепараторы конструкции СумГУ, обеспечивая высокую степень сепарации (до 99,9%) за счет предотвращения вторичного брызгоуноса, обладают большей производительностью по очищаемому газу и удельной нагрузке по жидкости по сравнению с мировыми аналогами гравитационно-инерционного и фильтрующего типа.

6. Достоверность полученных результатов подтверждается сравнительным анализом результатов численного математического моделирования и экспериментальных исследований, показывая их хорошую сходимость.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах [129,130].

РАЗДЕЛ 5

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТОВ СЕПАРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНЕРЦИОННО-ФИЛЬТРУЮЩИХ СЕПАРАТОРОВ

5.1. Методика расчета инерционно-фильтрующего жалюзийного блока газосепаратора

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны алгоритмы расчета и ряд математических зависимостей необходимых для расчета инерционно-фильтрующих сепараторов заданной производительности.

В результате проведения расчетов необходимо получить геометрические размеры жалюзи: высота пакета, размеры жалюзи (радиус гофр, количество гофр, длина прямолинейного участка, угол раскрытия гофр), количество жалюзей, высоту, на которой должны быть размещены щели для отвода уловленной жидкости из фильтра. Далее рассчитывается необходимая высота сепаратора, диаметр, размеры технологических патрубков.

Исходные данные для инженерного расчета инерционно-фильтрующего сепаратора:

- фракционный состав жидкости в газе (количество каждой из фракций в процентах и массовый состав);
- объемный расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$;
- требования относительно эффективности сепаратора;
- наличие твердых частиц (есть, нет);
- физические свойства газа и жидкости (плотность, вязкость);
- термодинамические условия в сепараторе (температура и давление).

Для расчета газосепаратора были упрощены математические выкладки изложенные в предыдущих разделах и составлена инженерная методика расчета, алгоритм которой представлен в виде блок-схемы (приложение Г).

Инженерная методика расчета инерционно-фильтрующего газосепаратора

Рассчитываем расходные характеристики потоков в рабочих условиях [153]:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T}, \rho_0 = \frac{M}{22,4}. \quad (5.1)$$

Массовый расход газа и жидкости рассчитываем по формуле ниже [153]:

$$G = \rho_0 V_0$$

$$L_0 = C_0 V_0. , \quad (5.2)$$

Объемный расход газа в рабочих условиях[153]:

$$V = \frac{22,4G}{M} \frac{TP_0}{TP} Z. \quad (5.3)$$

Математическое ожидание:

$$m_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ind_1 . \quad (5.4)$$

Дисперсия распределения:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Ind_1 - m_d)^2} , \quad (5.5)$$

$$\sigma_1^2 = (e^{\sigma_d^2} - 1)e^{2m_d - \sigma_d^2}. \quad (5.6)$$

Распределение капель на входе в канал:

$$n_0(d = 2R) = \frac{1}{d_i \sigma_d \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \frac{(Ind_1 - md)^2}{2\sigma_d^2}. \quad (5.7)$$

Исходя из экспериментальных данных и скорости уноса, находим коэффициент для расчета критической скорости газового потока. Реальная скорость в сепараторе должна быть меньше, чем скорость уноса [4]:

$$K_c = 0,36, \quad [V_r] = K_c \sqrt{\frac{P_q - P}{P}}. \quad (5.8)$$

Находим необходимую площадь поперечного сечения, исходя из объемного расхода газовой смеси и допустимой скорости:

$$S = V / [V_r]. \quad (5.9)$$

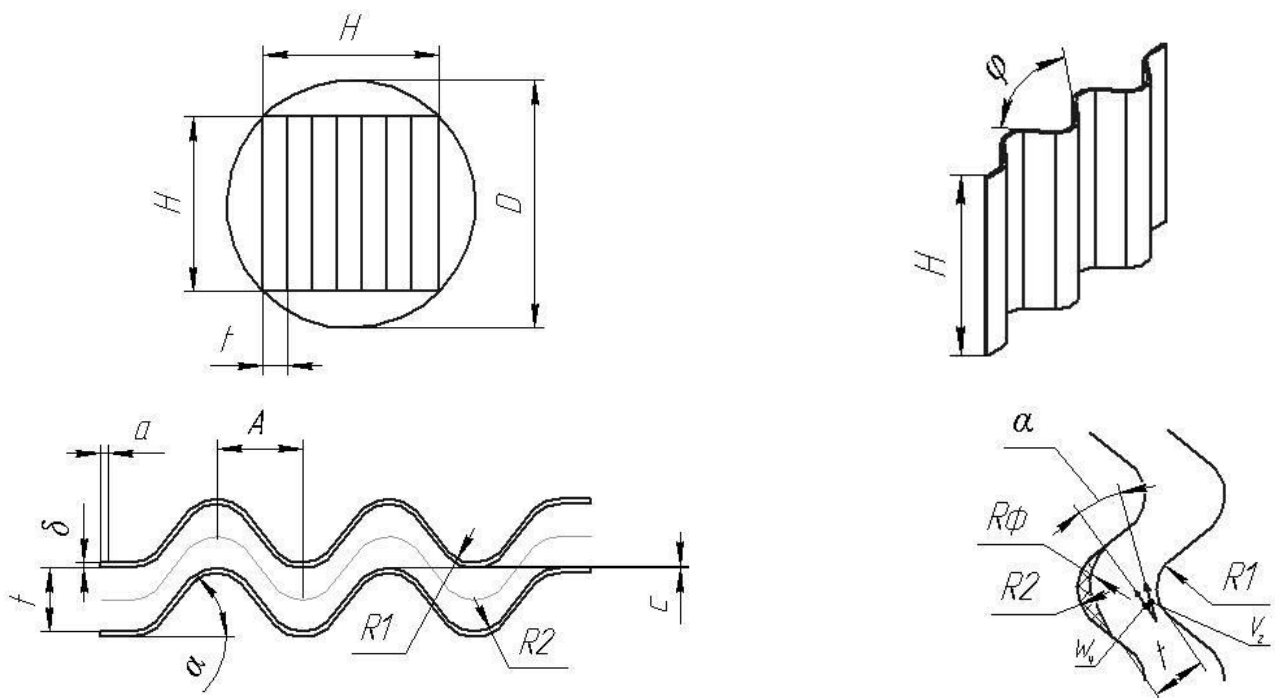


Рисунок 5.1 – Геометрические размеры сепарационных элементов

Зная необходимую площадь поперечного сечения, находим необходимую высоту жалюзи:

$$H=\sqrt{S};D=\sqrt{2H} . \quad (5.10)$$

Критический радиус гофры определяем по формуле [4]:

$$R_1 = R_{kp} = \frac{2 \cdot R_{min}^2 \cdot p_{ж} \cdot W_k^2 \cdot L \cdot S_c}{9 \cdot h \cdot S_{ж} \cdot \sin(\varphi/2) \cdot V_r \cdot W_k \cdot P_{ч}} - r_{min}^2 \quad (5.11)$$

После выяснения геометрических размеров жалюзи находим составляющие скорости газа и общую скорость. При определенных значениях радиуса и угла, при любом значении **Re** для первой гофры будем иметь выражение

$$V_r(R = 0,14m),$$

$$V_f(R = 0,14m),$$

$$V_r max = \sqrt{V_r^2 + V_f^2}. \quad (5.12)$$

$$V_r := \frac{-0,000001r^2 \Re \sin(2\varphi) + 0,000001r^2 \Re \cos(2\varphi) - 7,10^{-7} \Re}{r}, \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} V_f = & 0,00002744 \Re \cos(2\varphi) + 0,00002548 \Re \sin(2\varphi) + \\ & + (5,37824000010^{-9} \Re \cos(2\varphi)^2 + 5,37824000010^{-9} \Re^2 \sin(2\varphi)^2 \\ & + 4,60878857210^{-9} \Re^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

Зная скорости газа, находим их составляющие и общую скорость капель по методике, изложенной в разделе 2 (численное решение). Ниже приведён отрывок программы:

```
sys:={diff(Wr(tau),tau)=Wf(tau)^2/r+psi*Pi*mu*dk/8/m*(Vr(r)-
-Wr(tau)),diff(Wf(tau),tau)=-Wr(tau)*Wf(tau)/r+psi*Pi*mu*dk/8/m*(Vf(r)-Wf(tau))}:
K=psi*Pi*mu*dk/8/m:
rho[g]:=1.29:
r:=0.08:
psi:=0.44:
dk:=evalf(3*10^(-6)):
```



```

rho[K]:=1000:
mu:=0.000025:
m:=0.5236*dk^3*rho[K]:
K:=evalf(psi*Pi*rho[g]*dk^2/8/m):phi:=0.00001*Pi:
dphi:=0.06:
for c from 1 to 50 do
C1:=2.173:C2:=-2.063:C3:=1.138:
Vr(r):=((-r^2*C1*sin(2*phi)-r^2*C2*cos(2*phi)-C3)/r):
_C3:=2.835: _C1:=2236: _C2:=2502:
Vf(r):((((r^2*_C1*cos(2*phi)-
r^2*_C2*sin(2*phi))+sqrt((r^4*_C1^2*cos(2*phi)^2+r^4*_C1^2*sin(2*phi)^2+r^4*_
C2^2-_C3^2)/r)))):
print(Vf(r)):
sys:={diff(Wr(tau),tau)=Wf(tau)^2/r+K*((Vr(r))-Wr(tau)),diff(Wf(tau),tau)=
=-Wr(tau)*Wf(tau)/r+K*(Vf(r)-Wf(tau)),Wr(0)=0.001,Wf(0)=7}:
dsol1 := dsolve(sys, numeric, output=listprocedure,range=0...0.001):dsol1(0.0010):
Wr := subs(dsol1,Wr(tau)): Wf := subs(dsol1,Wf(tau)):
print(Wr(tau),Wf(tau)):

```

$$W_k = \sqrt{W_r^2 + W_\varphi^2}. \quad (5.14)$$

Зная площадь поперечного сечения, находим расстояние между жалюзями и необходимое количество каналов в пакете сепаратора:

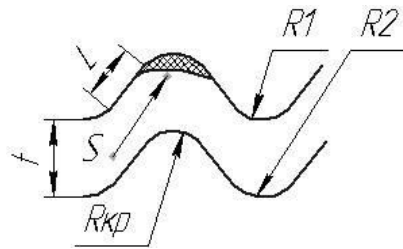


Рисунок 5.2 – Схема движения капли в канале

$$S \rightarrow t = \frac{V_r \cos a}{g} \cdot W_k, \quad (5.15)$$

$$n_k = \frac{H}{t} \quad (5.16)$$

Зная количество каналов, находим количество гофр по всей длине канала:

$$L_j = \int_{R_{jmin}}^{R_{jmax}} n_j(R_j),$$

$$L_j = L_0 - L_j.$$

(5.17)

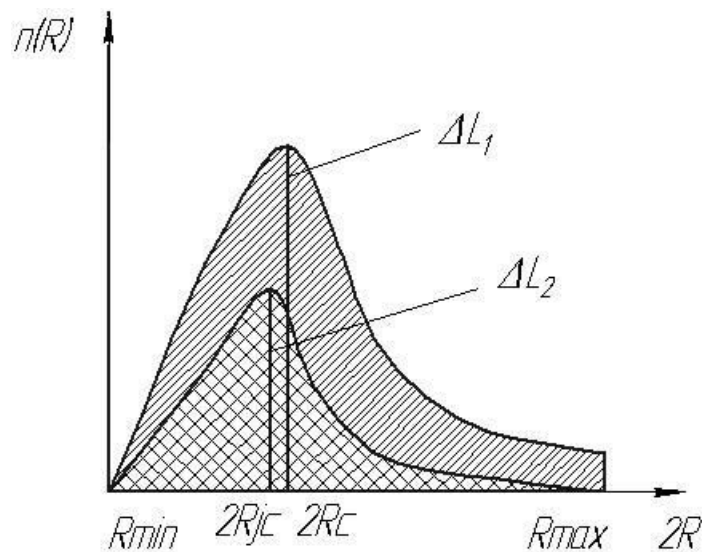


Рисунок 5.3. Определение эффективности сепарации на основе распределения капель по размерам

Определив все необходимые геометрические параметры жалюзи, находим ее эффективность:

$$\eta = \frac{L_0 - L_j}{L_0} \cdot 100\%. \quad (5.18)$$

Для расчета длины жалюзи находим эквивалентный диаметр прямоугольного сепарационного канала:

$$\begin{aligned} \Pi &= 2(H+t), \\ d_{\text{э}} &= \frac{4S}{\Pi}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Исходя из рекомендаций источника [73], для выравнивания поля скоростей принимаем длину прямолинейного участка и находим общую длину канала.

$$\begin{aligned} L_{\text{прям}} &= 3d_{\text{э}} \\ L_{\text{общ}} &= 2L_{\text{прям}} + 0,5 \cdot j2\pi. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Для отвода жидкости нам нужно определить необходимую площадь сечения дренажных каналов, равную суммарной площади поперечного сечения всех фильтрующих элементов, которая определяется из уравнения расхода

$$S_{\text{др}} = \frac{\left(\sum_1^n L_j\right) \cdot p_{\text{ч}}}{W_{\text{ж}}}. \quad (5.21)$$

Скорость движения жидкости принимаем $W_{\text{ж}} = 1 \dots 5$ м/с.

Зная количество гофр, определяем площадь поперечного сечения, необходимую для отвода жидкости.

Зная, что большинство жидкости из газа уходит в первой гофре, то произведем расчет по наиболее нагруженному элементу.

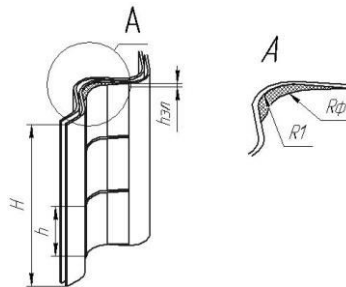


Рисунок 5.4 – Схема расположения полос фильтра по жалюзи

Находим высоту фильтра, необходимую для установки дренажного лотка.
 Схема расчета приведена на рисунок 5.5.

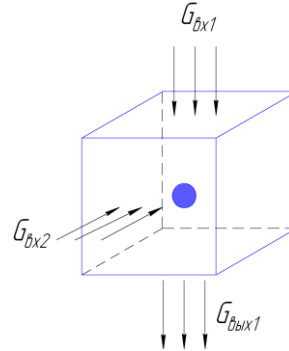


Рисунок 5.5. Схема расчета высоты насыщения фильтрующего элемента

Предположим, что влага попадает в фильтр равномерно по всей высоте.

Площадь фильтра:

$$S_{\phi} = \frac{R_{\phi}^2}{2} \left(\frac{\pi \cdot \varphi}{180} \sin(\varphi) \right). \quad (5.22)$$

Общий объем фильтра определяем по формуле:

$$V_{\phi} = S_{\phi} \cdot H \quad (5.23)$$

Емкость элементарного слоя фильтра равна:

$$V_{ж} = V_{\phi}^{эл} \cdot m V_{ж}, \quad (5.24)$$

где m – пористость фильтра

$$n_{эл} = H/h_{эл} \quad (5.25)$$

Количество уловленной жидкости одним минимальным элементом в первой (наиболее нагруженной) гофре

$$V_{\text{ж.ул}} = \frac{\eta \cdot L_0}{P_{\text{ч}} \cdot j \cdot n_{\text{к}} \cdot K_1 \cdot n_{\text{эл}}}, \quad (5.26)$$

где K_1 – часть жидкости, которая улавливается в первой гофре.

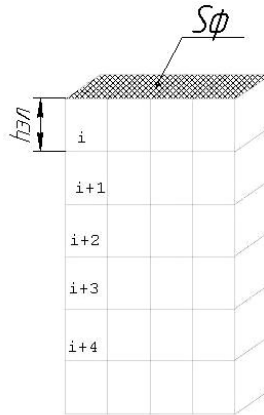


Рисунок 5.6 – Разбивка фильтра на элементарные высотные части

Количество элементарных частиц находим из формулы ниже

Общая высота фильтра до лотка равна

$$h = h_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}, \quad (5.27)$$

где $h_{\text{эл}}$ – высота элементарного участка фильтра, м;

$n_{\text{эл}}$ – количество элементарных участков фильтра до момента насыщения, шт.

5.2. Проведение производственных испытаний опытно-промышленных образцов инерционно-фильтрующих сепараторов

При выполнении диссертационной работы был исследован ряд конструкций газосепараторов и производства, где они будут установлены. После окончания теоретических и экспериментальных исследований поставлена и выполнена задача промышленного внедрения разработанных инерционно-фильтрующих газосепараторов.

Научные результаты, полученные в диссертационной работе «Гидродинамические характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов», внедрены при расчете экспертных исследований полученной инженерной

методики специалистами центра «PRDC» (г. Багдад, Ирак) (приложение А) гидравлического сопротивления, эффективности и геометрических параметров инерционно-фильтрующих сепараторов.

Результаты математического и физического моделирования исследовательского варианта инерционно-фильтрующего сепаратора представляют научно-практическую ценность при модернизации существующих и разработке новых газосепараторов, которые используются при добыче, переработке и транспортировке природного газа.

В диссертационной работе разработана инженерная методика расчета гидродинамических параметров инерционно-фильтрующего оборудования.

Предложенные результаты использованы для выдачи данных для проектирования промышленных газосепараторов для тонкой очистки газа.

Использование результатов исследований дает возможность повысить эффективность разделения газожидкостных систем, что приводит к повышению качества газового сырья.

Центр занимается исследованием новых разработок в нефтяной и газовой промышленности, а также их внедрением в производство. В процессе апробации методики расчета возникли вопросы у предприятий, которые помогают более точно определить область применения разрабатываемого аппарата.

1. Использование полипропиленовых фильтров дает возможность использовать их только для физического разделения. Никакой химической реакции в газосепараторе не происходит.

2. Так как разработанная конструкция сепаратора не подразумевает наличия в газе твердых частиц, то фильтры работают в режиме самоочистки, и уловленная жидкость удаляется под действием силы тяготения, то есть фильтр в регенерации и очистке не нуждается.

3. Так как не весь поток проходит через фильтрующую ткань, то говорить о перепаде давления на фильтре нет необходимости. Перепад давления на

фильтре в данном случае не является движущей силой и является величиной постоянной при выходе на стационарный режим работы.

4. При сохранении термодинамических параметров можно гарантировать сепарацию жидкой фазы. При изменении термодинамических условий и переходе компонентов из жидкости в газ их улавливание невозможно.

5. Для извлечения H_2S из газовой фазы перед газосепаратором можно установить высокоэффективный вихревой массообменный аппарат, который имеет низкую материалоемкость (по сравнению с колонными аппаратами в 7-10 раз). Также его эксплуатация требует меньших затрат.

В результате рассмотрения комиссия вынесла решение рекомендовать внедрить инерционно-фильтрующий газосепаратор на месторождениях и нефтегазоперерабатывающих заводах. Эти рекомендации подтверждены актом внедрения результатов, приведенным в приложении Б.

В результате аппарат внедрен в составе следующей технологической схемы.

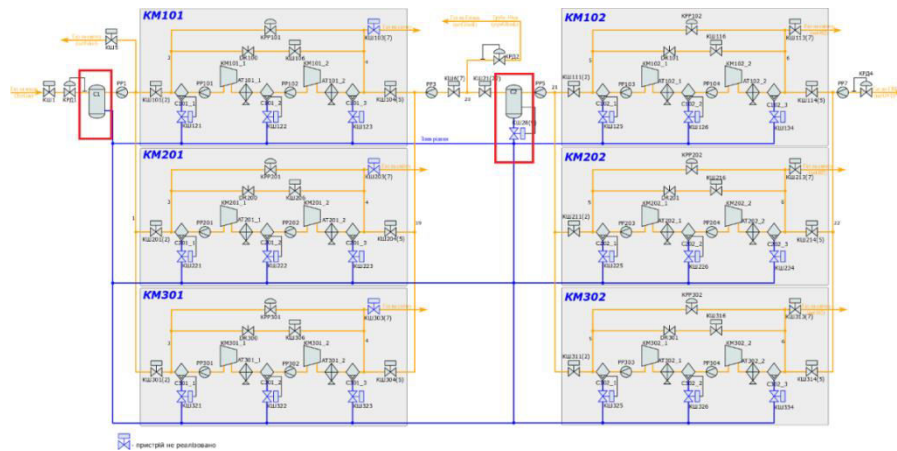
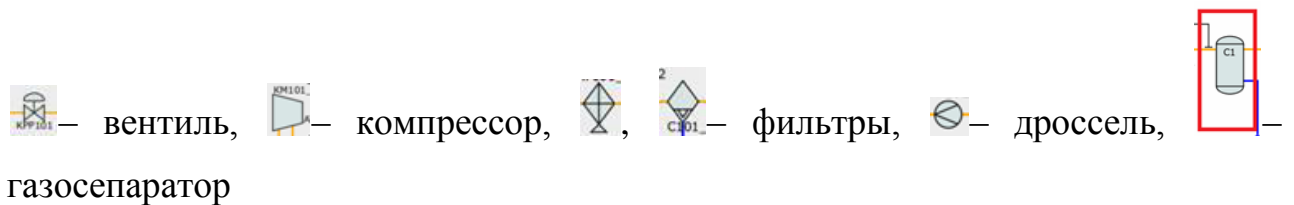


Рисунок 5.7 – Технологическая схема Пилиповского месторождения и КС:



Результаты работы внедрены при расчете газосепараторов Пилиповского месторождения (ООО «Западтехногаз») для изготовления на ООО «Технефтегазсервис», технологическая схема которого приведена ниже, а акт

внедрения в приложении Б.

Таблица 5.1

Компонентный состав газа при работе УПГ

№	Компонент	Концентрация газа, % об.		Степень извлечения компонентов, φ, %
		сырой газ	товарный газ	
1	Метан	69,701	70,849	-
2	Этан	15,842	15,970	-
3	Пропан	6,354	6,113	3,79
4	Изобутан	0,836	0,675	19,22
5	Н-бутан	1,626	1,146	29,48
6	Изопентан	0,295	0,119	59,52
7	Н-пентан	0,253	0,088	65,32
8	Гексан + высшие	0,286	0,140	50,88
9	Диоксид углерода	1,455	1,461	-
10	Кислород	0,072	0,103	-
11	Азот	3,282	3,336	-

Таким образом, на промышленной установке экспериментально подтверждено преимущество инерционно-фильтрующих сепараторов при работе на стационарном режиме по сравнению с традиционным оборудованием.

5.3. Выводы и рекомендации при проектировании инерционно-фильтрующих сепараторов тонкой очистки газа

При проектировании инерционно-фильтрующего оборудования необходимо обратить внимание на следующий аспект: происходит ли модернизация уже существующего оборудования или создается новый образец.

Проведение математических расчетов показало, что частицы мельче чем 20 мкм хуже улавливаются, так как на них уже недостаточно хорошо действуют

броуновские механизмы улавливания, но еще недостаточно хорошо – инерционные, поэтому рекомендуем устанавливать на входе в газосепаратор коагулятор или другие устройства для укрупнения капель.

Разработанные конструкции каналов имеют гидравлическое сопротивление до 300 Па, что невелико по сравнению с аналогами, но при установке дополнительных фильтрующих элементов или же других устройств для увеличения удельной производительности сепаратор при понижении металлоемкости сможет сохранить их конкурентность.

Проведенный расчет показывает, что достаточно иметь в канале лишь три гофры для достижения максимального эффекта разделения газожидкостной смеси, что позволяет проектировать аппараты, в которых можно устанавливать несколько пакетов инерционно-фильтрующих жалюзийных элементов, работающих параллельно. Наличие однотипных деталей может существенно удешевить производство аппаратов такого типа.

Использование высокопористых или двухслойных фильтрующих элементов позволяет использовать сепараторы данного типа даже при залповых выбросах газа в трубопровод.

Уменьшение радиуса поворота потока негативно влияет на вторичный брызгоунос, поэтому при расчете новой жалюзи необходимо производить расчет и принимать небольшой запас (10-15%), что должно выгодно отразиться на гидродинамике потока в сепарационном канале, не ухудшая эффективности. Расчеты показали, что эффективно происходит улавливание капель диаметром от 5 мкм.

Негативным фактором, который может вызвать выход из строя сепарационных элементов, есть наличие твердых частиц. Поэтому необходимо устанавливать инерционно-фильтрующий сепаратор в технологической схеме после оборудования грубой очистки от твердых частиц.

Выводы к разделу 5

1. Разработана инженерная методика гидродинамического расчета сепарационных характеристик инерционно-фильтрующих сепараторов с определением оптимальных конструктивных и геометрических параметров инерционно-фильтрующих сепарационных элементов.

2. Разработаны алгоритм и программа на ЭВМ для проведения технологического и конструктивного расчета инерционно-фильтрующих сепараторов.

3. Предложены новый способ и конструкция инерционно-фильтрующего сепаратора (защищенные международным сертификатом соответствия и патентом Республики Ирак), позволяющие существенно повысить степень очистки природного и попутного нефтяного потоков газа от воды и углеводородного конденсата.

4. Научные разработки инерционно-фильтрующих сепараторов конструкции СумГУ отмечены международным сертификатом соответствия и рекомендованы к внедрению в рамках государственной программы Министерства нефти и газа (PRDC) Республики Ирак.

5. Предложены практические рекомендации к процессу разработки и проектирования инерционно-фильтрующих сепараторов.

6. Приведены результаты внедрения полученных научных результатов и практических рекомендаций для проектирования инерционно-фильтрующих сепараторов на промышленном производстве в Украине.

Основные научные результаты раздела опубликованы в работах [132,134].

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. В результате анализа способов интенсификации процессов сепарации газодисперсных потоков выявлены недостатки существующих газосепарационных устройств, определены перспективные направления совершенствования технологий газосепарации и инерционно-фильтрующих газосепараторов, объединяющих преимущества инерционных и фильтрующих методов разделения газожидкостных систем, отличаются одновременно достаточно высокой эффективностью сепарации газа от капель жидкости в широком диапазоне изменения производительности и давления при низком гидравлическом сопротивлении.

2. Разработана физическая модель формирования и движения газокапельных потоков в рабочей полости инерционно-фильтрующих сепараторов, которая использована при оптимизационном геометрическом профилировании сечения криволинейных каналов и фильтрующих элементов.

3. Разработана математическая модель расчета гидродинамических и сепарационных характеристик при движении неосесимметричных газокапельных потоков в криволинейных сепарационных каналах синусоидального профиля.

4. Экспериментально исследовано распределение полей скоростей и давлений при движении газодисперсного потока в модельных образцах криволинейных инерционно-фильтрующих сепарационных каналов с переменной геометрией, определены гидравлические и сепарационные характеристики модельных образцов инерционно-фильтрующих сепараторов, проведено сопоставление результатов с теоретическими расчетами.

5. Разработана инженерная методика технологического и конструктивного расчетов жалюзийных блоков инерционно-фильтрующих сепараторов.

6. Предложен новый способ и конструкция инерционно-фильтрующего сепаратора (защищенные международным сертификатом соответствия и патентом Республики Ирак), позволяющие существенно повысить степень очистки природного и попутного нефтяного потоков газа от воды и углеводородного конденсата.

7. Проведено внедрение полученных научных результатов и практических рекомендаций для проектирования инерционно-фильтрующих сепараторов на предприятиях Украины. Инерционно-фильтрующие сепараторы конструкции СумГУ успешно прошли сертификацию и рекомендованы к внедрению в рамках государственной программы Министерства нефти и газа (PRDC) Республики Ирак.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Склабинский В.И. Анализ технологической схемы и работы оборудования установки осушки природного газа и узла сепарации / Склабинский В. И., Стороженко В. Я., Смирнов В. А., Ляпощенко А. А. //Экотехнологии и ресурсосбережение. –2003. – №6. – С. С.18-24.
2. Ляпощенко О. О. Високоєфективне інерційно-фільтруюче газосепарційне обладнання у нафтогазовій промисловості / О. О. Ляпощенко, В. І. Склабінський // Проблеми економії енергії: збірник матеріалів ІV Міжнародної науково-практичної конференції. –Львів, 2003. –С. 106–107.
3. Синайский Э. Г. Сепарация многофазных многокомпонентных систем / Э.Г. Синайский, Е.Я. Лапига, Ю. В.Зайцев. –М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 621 с.
4. Бекиров Т.М. Сбор и подготовка к транспорту природных газов / Т. М. Бекиров, А.Т. Шаталов. – М.:Недра,1986.–261с.
5. Зиберт Г.К. Подготовка и переработка углеводородных газов и конденсата. Технологии и оборудование: справочное пособие / Зиберт Г.К., Седых А.Д., и др.– М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2001. – 316 с.
6. Швыдкий В.С. Очистка газов: справочник / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев.–М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 стр.
7. Синайский Э.Г. Разделение двухфазных многокомпонентных смесей в нефтегазопромышленном оборудовании / Э. Г. Синайский. – М.: Недрa,1990. – 272 с.
8. Ужов В. Н. Очистка газов мокрыми фильтрами / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М.: Химия, 1972. - 248 с.

9. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков / А. А. Халатов. – Киев: Науковадумка, 1989. – 192 с.
10. Щукин В. К. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В. К. Щукин, А. А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
11. Гольдштик М.А. Вихревые потоки / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.
12. Меркулов А.П. Управление движением жидкости / А. П. Меркулов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 174 с.
13. Ахмедов Р.Б. Аэродинамика закрученной струи / Р. Б. Ахмедов. – М.: Энергия, 1997. – 238 с.
14. Дорфман Л.А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел / Л. А. Дорфман. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 260 с.
15. Щукин В. К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил / В. К. Щукин. – М.: Машиностроение, 1980. – 240 с.
16. Косенков В.Н. Разделение газожидкостных потоков в центробежных сепарационных аппаратах: дисс. канд. техн. наук: 05.17.08 / В. Н. Косенков. – Баку, 1988. – 173 с.
17. Толстов В. А. Создание сепарационных устройств для технологических установок промышленной подготовки газа: дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.07 / В. А. Толстов. – Баку, 1987. – 190 с.
18. Пат. 2096069 РФ, МКИ В01 D45/04. Устройство для очистки газа: Е. П. Запорожец, Б. С. Полей, Г. К. Зиберт; АО «Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры». – №96115804/25; заявл. 30.07.96; опубл. 20.11.97; Бюл №32. – 178 с.

19. А.с. 1785724 СССР, МКИ В01 D45/08. Пылежидкостный отделитель /А.И. Лифарь. – №4863342/26; заявлено 03.09.90; опубл. 07.01.93, Бюл. №1.
20. А.с. 1607342 СССР, МКИ В01 D45/08. Газожидкостный сепаратор/ А. К. Макеев. – Инж.-строит. ин-т, № 42892945/33; заявлено 23.03.86;опубл. 23.11.86, Бюл. № 32.
21. А.с. 1607890 СССР, МКИ В01 D45/08. Газожидкостный сепаратор/ А. И. Лифарь, А.В. Макеев. –Инж.-строит. ин-т, №42892778/31; заявлено 18.06.87;опубл. 23.11.89, Бюл. №43.
22. А.с. 1792725 СССР, МКИВ01 D45/06. Сепаратор капельной жидкости / А.И. Лифарь. – №4837301/26; заявлено 11.06.90; опубл.07.02.93, Бюл. №5.
23. Пат. 4971613 США, МКИ В01 D45/00. Vane extractor with extended drain/Valliant Charler В.; Peerless Manufacturing Co. – №382249; заявлено 19.07.89;опубл. 20.11.90, НКИ 55/440.
24. Пат. 2062139 РФ, МКИ В01 D45/08. Газожидкостный сепаратор /О.И. Квасенков, О. И. Андропова; Всероссийский НИИ консервной иовощесушильной промышленности. – № 93044232/26; заявл. 09.09.93;опубл. 20.06.96; Бюл №17.
25. ОНТП 51-1-85.Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть I. Газопроводы. – Москва, 1986.
26. Пат. 2079342 РФ, МКИ В01 D45/04. Прямоточный сепаратор / В.С. Щипачев. – №95113949/25; заявл. 03.08.95; опубл. 20.05.97, Бюл. №17.
27. Пат. 2013108 РФ, МКИ В01 D45/00. Способ сепарации жидкости из газожидкостного потока и устройство для его осуществления /А.А. Бузов; Московский авиац. ин-т. им. С. Орджоникидзе, №4790618/26;заявл. 12.02.90; опубл. 30.05.94, Бюл. №10.

28. Каплеуловитель коленного типа. Промышленная и санитарная очистка газов / Г.К. Лебедюк, А.Ю. Вальдберг, М.П. Громова, В.П.Приходько. – М.: НИИИГаз, 1980. – 7 с.

29. А.с. 1819679 СССР, МКИ В04 С5/30. Вихревой пылеуловитель / М.Н. Калдыханов, М.А. Алтыбаев, Ю.К. Туляев, Г.Г. Шауберт; Казанский хим.-технол. ин-т. – №4901984/26; заявл. 11.01.91; опубл. 07.06.93, Бюл. №21.

30. Пат. 158749 Польша, МКИ В04 С5/14. Циклонный пылеотделитель: Zielinski Henryk, Skiba Helmut, Sciazko Marek и др. – №275721; заявл. 08.11.88; опубл. 30.10.92.

31. Пат. 2632216 Франция, МКИ В04 С3/06. Устройство для очистки газа: Villers Pierre, Dijken Marten. – №8907171; заявл. 31.05.89; опубл. 08.12.89.

32. Пат. 20772 РФ, МКИ F01 D25/00. Центробежный сепаратор / О. А. Поваров. – №2001116391/20; заявл. 20.06.01; опубл. 27.11.01, Бюл. №33.

33. Вигдорчик Д. Я. Газовое оборудование, приборы и арматура (справочное руководство) – изд. 2-е перераб. и доп. / Д. Я. Вигдорчик, Б. В. Гвоздев. – М.: Недра, 1972. – С. 520.

34. Макаров Ю. И. Технологическое оборудование химических и нефтегазоперерабатывающих заводов / Ю. И. Макаров, А. Э. Генкин. – М.: Машиностроение, 1976. – 368 с.

35. Пат. 2162361 Россия, МПК⁷ В 01 D 46/00. № 2000101602/12; 11.МБ.230. Способ очистки газов от тонкодисперсной капельной жидкости / Г.И. Вяхирев, А.В. Загнитько, С.Н. Ходин, Ю.О. Чаплыгин; заявл. 26.01.2000; опубл. 27.01.2001; рус.

36. US patent. Centrifugal separator for entraining a separated liquid with minimal air mixture № 5,709,643 от 20 января 1998 г.

37. Ergun S., Orning A.A. Chem Eng. Progr., 1952. – V.48.

38. Ентов В. М. Теория фильтрации / В. М. Ентов // Соросовский образовательный журнал. – Москва, 1998. – №2. – С. 121-128.
39. Фукс Н. А. Успехи механики аэрозолей. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1961. – 161с.
40. Справочник по пыле-золоулавливаю / Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
41. Кутателадзе С. С. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стыркович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
42. Химическая гидродинамика: справочное пособие / Кутепов А. М., Полянин А. Д., Запрянов А. Д., Вязьмин А. Д., Казенин Д. А. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.
43. Кутепов А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М.: Высшая школа. 1986. – 448 с.
44. Сидельковский Л. Н. Котельные установки промышленных предприятий / Л. Н. Сидельковский, В. Н. Юренев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528 с.
45. Кибрик П. С. Эксплуатация котельных установок небольшой производительности / П. С. Кибрик, Г. Р. Либерман. – М.: Энергия, 1969.– 360 с.
46. Декларацийний патент України №60782, МПК В01D45/04, 2003.
47. Декларацийний патент України №69701, МПК В01D45/04, 2003.
48. Логвин А. В. Моделювання роботи інерційно фільтруючого газосепаратора / А. В. Логвин, О. О. Ляпощенко, В. І. Склабінський //Вісник СумДУ. –2008. – № 2 . –С. 14-16.
49. Патент України. Заявка №2003021503 від 20.02.2003, МПК 7В01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко.

50. Склабінський В.І. Підвищення ступеня утилізації побіжного нафтового та природного газів шляхом застосування високоефективного газосепараційного устаткування [Текст] / В.І. Склабінський, О.О. Ляпощенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2004. – №2(61). — С. 65-69.
51. Кочин Н. Е. Теоретическая Гидромеханика/ Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – 1963. –Ч.1, Ч.2.
52. Зверев Н. И. О движение твердой частицы в потенциальном вращающемся потоке / Н. И. Зверев, С. Г. Ушаков // Инженерно-физический журнал. – 1968. –ТомXIV,№ 1. – С. 56-64
53. Ушаков С. Г. Инерционная сепарация пыли / С. Г. Ушаков, Н. И. Зверев. – М.:Энергия, 1974.– 164 с.
54. Коваленко В.П. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений / В. П. Коваленко. – М.: Химия ,1982. – 272 с.
55. Химическая энциклопедия: в 5 т./А-Дарзана / редкол. И. Л. Кнунянц и др.–М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т.1. – 623 с.
56. Мустафа Аль Раммахи.Фізична модель руху газокраплинних потоків сепараційними каналами та фільтруючими секціями інерційно-фільтруючих газосепараторів / Мустафа Аль Раммахи, А. В. Логвин, О. О. Ляпощенко// Нафтогазова енергетика. –2011. – № 2. – С. 5-7.
57. Кирш А. А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП / А. А. Кирш, А. К. Будыка, В. А. Кирш // Российский химический журнал. – 2008. –Т. LI, № 5.– С. 136 –142.
58. Численный анализ двухфазного течения в газодинамическом фильтре/ Пирумов У. Г. , Гидаспов В. Ю. , Даниелян А. А. , Иванов И. Э. , Крюков И. А. , Муслаев А. В. // Матем. моделирование. – 1998. – № 10-11. – С. 19-28.

59. Подвысоцкий А. М. Критические условия разрушения капель газовым потоком / А. М. Подвысоцкий, В.В. Дубровский. – М. : Химия, 1989. – 232 с.
60. Статистическая модель дробления капель в турбулентном потоке жидкости / Баранова Т. А., Бабенко В. А., Герцович В. А., Жукова Ю. В., Сосинович В. А. – М. : Недра, 1998. – 58 с.
61. Моделирование процессов очистки отработавших газов химических производств и дизельных агрегатов от твердых частиц СВС-фильтрами / Евстигнеев В.В., Новоселов А. Л., Пролубников В. И., Тубалов Н. П. // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, №1, С. 23-38.
62. Мухин В. А. Исследование процессов тепломассообмена при фильтрации в пористых средах / В. А. Мухин, Н. Н. Смирнова. – (Препринт / Новосибирск, 1978. – С. 26-78).
63. Методика исследования фильтрации модели Гагена // Инженерно - физический журнал. – 1975. – С. 14-18.
64. Михайлов П. Н. Температурное поле в изолированном пласте при фильтрации реального газа / П. Н. Михайлов, Л. Ф. Халимов. – М. : Химия, 1985. – 322 с.
65. Ажиханов Н.Т. Некоторые вопросы исследования фильтрации жидкости в анизотропной пористой среде / Н. Т. Ажиханов // Современные проблемы науки и образования. – 2008. – № 3 – С. 122-127.
66. Математическое моделирование работы скорых фильтров / М. Д. Носков, М. С. Зайцева, А. Д. Истомина, О. Д. Лукашевич // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 2. – С.126-137.
67. Кирш А.А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП / А.А. Кирш, А.К. Будыка // Российский химический журнал. – 2008. –Т. LII, № 5. – С. 97-102.

68. Фильтрующие материалы из нановолокон: сборник тезисов докладов / НИФХИ. – М. : Недра, 1978. – 292 с.
69. Скобеев И.К. Фильтрующие материалы / И. К. Скобеев. – М.:Недра, 1978. – 200 с.
70. Баренблатт Г. И. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
71. Жерновой А. Д. Способ решения нелинейного уравнения фильтрации несжимаемой жидкости в анизотропных средах/ А.Д. Жерновой // Сборник научных трудов СевКавГТУ.Серия «Естественнонаучная». – 2005. – №1. – С. 12–19.
72. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. / Р. И. Нигматулин. – М. : Химия, 1987. – Часть1. – С.189.
73. Brinkman H.C. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles// Appl. Sci. Res. – 1947.– Vol. A1. – P.46–64.
74. Мильштейн Л. М. Нефтегазопромышленная сепарационная техника: справочное пособие / Л. М. Мильштейн, С. И. Бойко, Е. П. Запорожец. – М.: Недра, 1991. – 236 с.
75. Буров А. А.Континуальная модель запыленного криволинейного течения газа / А. А. Буров, А. И. Буров, В. Я. Гамолич. – Одесса, 2004. – Вып.2(22).
76. Hobler T. Minimum Zraszania Powierzchni / T. Hobler // *Chimia Stosowana*. – 1964. – Bd. 2В. – S. 145 - 159.
77. Аль Раммахі М. М. Отримання початкових даних для математичного моделювання газодинаміки газового потокув каналі ІФ сепаратора / Аль Раммахі М.М., А.В. Логвин, В.І.Склабінський// Інноваційний потенціал української науки - XXI сторіччя: 14 Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Запоріжжя, Україна, 12-20 грудня. – Запоріжжя, 2012 г. – С. 80-85.

78. Гриценко А.И. Физические методы переработки и использования газа / А. И. Гриценко. – М.: Химия, 1981. – 222 с.
79. Ужов В. Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М.: Химия, 1975. – 216 с.
80. Патент РФ RU (11) 2105595 (13) С1 (51) МПК⁶
81. Дейч М. Е. Техническая газодинамика / М. Е. Дейч. – Издание: 2-е. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 669 с.
82. Фукс Н.А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М.: Издательство АН СССР, 1955. – 353 с.
83. Берлин М.А. Переработка нефтяных и природных газов / М. А. Берлин, В. Г. Гореченков, Н. П. Волков. – М.: Химия, 1981. – 472 с.
84. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справочник / Г. М.-А. Алиев. – М.: Химия, 1986. – С. 306.
85. Биргер М.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
86. Лутошкин Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды / Г.С. Лутошкин. – М.: Недра, 1977. – 192 с.
87. Андреев П. А. Теплообменные аппараты ядерных энергетических установок / П. А. Андреев. – Изд. 2-е. – М.: Химия, 1969. – 352 с.
88. Базлов М. Н. Подготовка природного газа и конденсата к транспорту / М. Н. Базлов, А. И. Жуков, Т. С. Алексеев. – М.: Недра, 1968. – 215 с.
89. Белоусов В.Д. Трубопроводный транспорт нефти и газа / В. Д. Белоусов. – М.: Химия, 1978. – 408 с. (нет стр. 319-342).
90. Физические методы переработки и использования газа / А. И. Гриценко и др. – М.: Недра, 1981. – С. 34-72.

- 91.Зыков А. К. Паровые и водогрейные котлы / А. К. Зыков. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 129 с.
- 92.Тепловые и атомные электростанции: справочник / редакторы А. В. Клименко, В. М.Зорин. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – Книга 3.– 648 с.
- 93.Коваленко В.Ф. Судовые водоопреснительные установки /В. Ф. Коваленко, Г. Я. Лукин. –Ленинград: Судостроение, 1970.– 304 с.
- 94.Коротаев Ю.П. Добыча, транспорт и подземное хранение газа / Ю. П. Коротаев. – М.: Химия, 1984. – 488 с.
- 95.Николаев В. В. Основные процессы физической и физико-химической переработки газа / В. В. Николаев, Н. В. Бусыгина, И. Г. Бусыгин. – М.: Недра, 1998. – 184 с.
- 96.Юренев В. Н. Теплотехнический справочник/ В.Н. Юренев, П. Д. Лебедев. – Изд. 2-е, перераб.– М.: Энергия, 1975. – Том 1.– 744 с.
- 97.Большаков Г.Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов/ Г.Ф. Большаков. – М.: Недра,1974. – 320 с.
- 98.Бунчук В.А. Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и газа / В. А. Бунчук. – М.: Недра, 1977. – 366 с.
- 99.Гуревич Д. Ф. Защитно-предохранительные устройства нефтегазового оборудования: справочное пособие / Д. Ф. Гуревич, О. Н. Шпаков, О. Н. Заринский. – Л., 1991. – 347 с.
100. Газовое оборудование, приборы и арматура:справочное руководство / Д.Я. Вигдорчик, Б.В. Гвоздев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.:Недра, 1972. – 520 с.
101. Калашников О.М. Особливості газодинаміки та ефективність прямоточних краплєвловлювачів компресорних станцій: автореф. дис.... канд. техн. Наук: 05.05.15/ О. М. Калашников.– Суми, 2003.

102. Требин Ф. А. Добыча природного газа / Ф. А. Требин, Ю. Ф. Макогон, К. С. Басниев. – М.: Недра, 1976. – 368 с.
103. Мынкин К.П. Сепарационные устройства паровых котлов / К. П. Мынкин. – М.: Энергия, 1971. – 192 с.
104. Ватин Н.И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец. – М.: Препринт, 2003. – 213 с.
105. Маслов А.С. Совершенствование технологии подготовки газа с применением моделирующей системы: автореф. дис.... канд. хим. Наук: спец. 05.17.08 «Химическая технология»/ А. С. Маслов. –Томск, 2003.
106. Кострыкин В. А. Теория тепловых процессов и современные проблемы реновации паротурбинных установок: монография / В. А. Кострыкин, И. Г. Шелепов, А. Л. Шубенко. – Харьков, 2007. – 185 с.
107. Бочкарев А. А. Модель Бринкмана с учетом неравномерной пористости [Электронный ресурс] / А. А. Бочкарев, В. И. Волков. – Режим доступа: <http://izvestia.asu.ru/2002/1/phys/TheNewsOfASU-2002-1-phys-02.pdf> – УДК 532.5 +536.2.
108. Лунев В.В. Течения газов с большими скоростями / В. В. Лунев. – М.: Физматлит, 2007. – 760 с.
109. Чекалюк Е.Б. Термодинамика нефтяного пласта / Е. Б. Чекалюк. – М.: Недра, 1965. – 240 с.
110. Сигунов Ю. А. Влияние межпластовых перетоков и капиллярных сил на процесс вытеснения нефти в слоисто-неоднородном пласте / Ю. А. Сигунов, Г. Р. Усманова // Изв. РАН. МЖГ. –2007.– № 6. –С. 85–92.
111. Лешаков О. Э. Коагуляция частиц в стохастической среде / О. Э. Лешаков, В. М. Логинов //Сиб. журн. индустр. матем. – 2000. – № 3:2. – С. 159–171.

112. Стручаев А. И. Гомогенизация молока противоточно-струйным диспергированием: анализ условий и эксперимент / А. И. Стручаев, Н. И. Стручаев. – Москва; Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004. – 628 с.
113. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет. – Москва; Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004. – 628 с.
114. Александрова Ю.Н. Разработка способов регулирования структуры и свойств волокнистых нетканых материалов: автореф. дис.... на соиск. уч. степ.канд. техн. Наук: специальность 05.17.06 «Технология и перераб. полимеров и композитов» / Александрова Юлия Николаевна; Моск. гос. ун-т дизайна и технологии.– Москва, 2008. – 24 с.: ил.; 21 см.
115. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / пер. с англ. В.С.Занадворова; под ред. и с предисл. Е.М.Четыркина. –М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с., ил.
116. Аль Раммахи М. М. Расчет начального участка инерционного фильтрующего газосепарационного элемента при помощи теории клеточных автоматов / Аль Раммахи М. М., А. В. Логвин // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2011. – №4. – С. 73–76.
117. Аль Раммахі М. М. Расчет скорости газового потока в канале инерционно-фильтрующего (ИФ) сепаратора / М. М. Аль Раммахи, А.В. Логвин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2.– С. 55–57.
118. АльРаммахи М. М. Hydrodynamics of inertial-filtering (IF) separate sections of gas-separating oil and gas equipment / М. М. АльРаммахи, А.В. ЛогвинВ. І. Склабінський, О. О. Ляпощенко // Board of the Journal of Missan researches, Iraq. –2012. – Vol.8. – №.16. – С. 207–226.
119. Аль Раммахи М. М. Разработка физической модели движения

газокапельных потоков в рабочей полости Инерционно-фильтрующих (ИФ) - сепараторов / М. М. Аль Раммахи А. В. Логвин, О. О. Ляпощенко // Хімічна промисловість України. – 2012. – №6. – С. 18-21.

120. Аль Раммахи М. М. Моделирование структуры фильтрующего элемента инерционно-фильтрующего сепаратора с помощью теории клеточных автоматов / М. М. Аль Раммахи, А.В. Логвин // Вестник ХПИ. – 2012. – № 63. – С. 159–163.

121. Аль Раммахі М. М. Застосування сучасних вискоефективних інерційно-фільтрувальних сепараторів у харчовій промисловості / М. М. Аль Раммахі, Логвін А. В., Ляпощенко О. О., Склабінський В. І. // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса, 2013. – Вип.44, Том 1. –С. 277–281.

122. Аль Раммахі М. М. Physical model of formation high dispersion gas condensate systems in turbulent gas flow Project SWorld/ М. М. АльРаммахі, О. О. Ляпощенко, О. В. Настенко // Technical sciences – Chemical technologies Kupriyenko SV.–Odessa, 2013. – Режим електронного доступу: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/J21310.pdf>

123. Аль Раммахи М. М. Моделирование напряженно деформированного состояния и прочностно-элементный анализ конструкции инерционно-фильтрующего газосепаратора/ М. М. Аль Раммахи // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков:ТАРП, 2013. – №2/1(10). – С. 3–5 .

124. Аль Раммахі М. М. Експериментальне дослідження гідродинамічних параметрів роботи інерційно-фільтруючих сепараторів / В. І. Склабінський, А. В. Логвін, О.О. Ляпощенко, М.М. Аль Раммахі // Стратегія якості в промисловості і освіті: VII Міжнародна конференція, г. Варна, Болгарія, 3–10 червня 2011 г.–Варна, 2011. – Том 3. – С. 167–169; Том 1. – С. 81–83.

125. Аль Раммахі М.М. Отримання початкових даних для математичного моделювання газодинаміки газового потоку в каналі ІФ- сепаратора/ Аль Раммахі М.М., Логвин А.В., Склабінський В.І.// Інноваційний потенціал української науки - ХХІ сторіччя: 14-та Всеукраїнська науково-практична конференція. –Запоріжжя, Україна, 12–20 грудня, 2012 р. – С. 80-85.

126. Аль Раммахі М.М. Комп'ютерне моделювання течії газу в ІФ-газосепараційному каналі/ М.М. Аль Раммахі, А.В. Логвин //Комп'ютерне моделювання в хімії, технологіях і системах сталого розвитку: третя міжнародна науково-практична конференція, м. Рубіжне, Україна, 10–12 травня 2012 р. – Рубіжне, 2012.– С. 90-92.

127. Аль Раммахи М.М. Оптимизация формы фильтрующего элемента в инерционно-фильтрующих сепараторах/ М.М. Аль Раммахі, А.В. Логвин //Хімічна технологія: наука та виробництво: I Всеукраїнська науково-технічна конференція, м. Шостка, Україна, 7 – 9 листопада 2011 р.– Шостка, 2011. – С. 93.

128. Аль Раммахи М.М. Экспериментальное определение оптимальных гидродинамических режимов инерционно-фильтрующих сепараторов/ М.М. Аль Раммахи, А.В. Логвин// Сучасні технології в промисловому виробництві: матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, м. Суми, 18–22 квітня 2011 р.– Суми, 2011. – Ч. 1. – С. 124.

129. Аль Раммахі М.М. Определение влияния геометрических характеристик канала инерционно-фильтрующего (ИФ) сепаратора на гидродинамику/ М.М. Аль Раммахи, А.В. Логвин// Сучасні технології у промисловому виробництві: II Всеукраїнська міжвузівська науково-технічна конференція, м. Суми, 17–20 квітня 2012 р. – Суми, 2012.– Ч. 2. – С. 156.

130. Аль Раммахі М.М. Високоєфективні інерційно-фільтруючі газосепаратори для промислових установок комплексної підготовки газу газових

та газоконденсатних родовищ/ М.М. Аль Раммахі, А.В. Логвин, В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко // Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Полтава, Україна, 26–28 вересня 2012 р. – Полтава, 2012. – С. 131-134.

131. Аль Раммахі М.М. Моделирование течения газовой фазы в фильтре инерционно-фильтрующего (ИФ) газосепарационного элемента с помощью теории клеточных автоматов / М.М. Аль Раммахи, А.В. Логвин // Технология – 2012: Международная научно-техническая конференция, г. Северодонецк, Украина, 6–7 апреля 2012 г. – Северодонецк, 2012. – С. 62–64.

132. Физическая модель формирования высокодисперсных газоконденсатных систем в турбулентном потоке газа / М. М. Аль Раммахі, А. В. Логвин, О. О. Ляпощенко, О.В.Настенко // Материалы Международной научно – практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований». – Одесса, 2013. – Т. 7. – С. 70–75.

133. Аль Раммахі М.М. Фізична модель руху газокраплинних потоків по сепараційних каналах та фільтруючих секціях інерційно-фільтруючих газосепараторів / М. М. Аль Раммахі, А.В.Логвин, О.О. Ляпощенко // Нафтогазова енергетика-2011: Міжнародна науково-практична конференція та виставка, м. Івано-Франківськ, Україна, 10–14 жовтня 2011 р. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 22–23.

134. Аль Раммахи М.М. Моделирование напряженно деформированного состояния и прочностно-элементный анализ конструкции инерционно-фильтрующего газосепаратора/ М.М. Аль Раммахи, Логвин А. В., Ляпощенко О. О., Маренок В. М. // Вычислительный интеллект – 2013(ComInt): Международная научно- практическая конференция, 14–18 мая 2013 г. –Черкаси.– С. 385.

135. Аль Раммахі М.М. Physical conditions and mechanisms for separation condensate systems/ М.М. Аль Раммахі, Логвин А. В., Ляпощенко О. О., Настенко

О. В. // Стратегия качества в промышленности и образовании: IX Международная конференция ,г. Варна, Болгария, 31мая – 7 июня 2013 г.– Варна, 2013. – Том 1. – С. 81–83.

136. Алямовский А. А. /SolidWorksSimulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. –М., 2012. – 455 с.

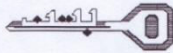
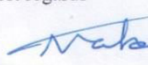
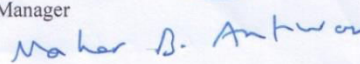

137. Аль Раммахи М. М. Gas flow formation in the inertial filtering (IF) Gas Separators Curvilinear channels / М.М. АльРаммахи, СклабинскийВ. И.,ЛогвинА. В.,ЛяпощенкоА. А. // Journal of engineering. – 2014. – № 5, Vol. 20. – P. 160 – 169.

138. Пат. № 277/2012 Ирак. Способ очистки природного и попутного нефтяного газа от воды и углеводородного конденсата / В.И. Склабинский, А.В. Логвин, А.А. Ляпощенко, М.М. Аль Раммахи. - Центральная организация по стандартизации и контролю качества. – Опубликовано 26.11.2013.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Акт внедрения научно-технических результатов диссертационной работы на месторождениях и нефтегазоперерабатывающих заводах

<p>Republic Of Iraq Ministry Of Oil Petroleum R & D Center</p>		<p>جمهورية العراق وزارة النفط مركز البحث والتطوير النفطي</p>
<p>Ref: Date:</p>	<p style="text-align: right;">العدد: ب ت / ٦٢٩٨ التاريخ: ٢٠١٢/١٢/٢٧</p>	
<p>ACT OF APPLICATION</p>		
<p>Certificate of the results application of Al-Rammahi Mustafa Makki's thesis "The hydrodynamic characteristics of inertial and filtering separators" and their manufacturing application at "PRDC, Iraq - Baghdad"</p> <p>The present certificate ascertains the fact that scientific results of Al-Rammahi Mustafa Makki's thesis "The hydrodynamic characteristics of inertial and filtering separators" were implemented for estimation of hydraulic resistance, efficiency and geometric parameters of inertial and filtering separators.</p> <p>The results of mathematical modeling and physical simulation of testing version of inertial and filtering separator are of theoretical and practical value for updating and designing new gas separators which are used for natural gas production, gas conversion process and gas transporting.</p> <p>The engineering design procedure of hydrodynamic parameters of inertial and filtering devices was worked out in the thesis.</p> <p>The suggested results are used for designing of industrial gas separators for fine gas cleaning.</p> <p>The implementation of the research results will increase the efficiency of gas-liquid mixtures separation which will result in increase of quality of gas raw Stock.</p>		
<p>Best regards</p>  <p>Dr. Kareem A. Alwan PRDC. Manager</p> 		
<p style="font-size: small;">Address : Baghdad / Waziriyah/ next to the petroleum Institute العنوان : بغداد - الوزيرية / قرب معهد النفط e-mail: prdc2004@yahoo.com البريد الإلكتروني: prdc2004@yahoo.com www.prdc.gov.iq prdc2004@prdc.gov.iq prdc2004@prdc.gov.iq</p>		

Приложение Б.

Акт внедрения научно-технических результатов диссертационной работы на месторождениях и нефтегазоперерабатывающих заводах

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор
 Товариство з обмеженою відповідальністю «ЗАХІДТЕХНОГАЗ»
 П.В. Храбатин
 2013р.

ІДЕНТИФІКАЦІЙНИЙ КОД 38331376

АКТ

про впровадження науково-технічних результатів дисертаційної роботи на здобування наукового ступеня кандидата технічних наук Мустафи Маккі Аль Раммахі МохаммедАлі

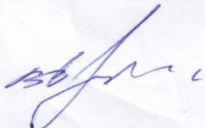
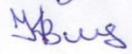

Даним актом засвідчується, що наукові результати, технологічні рекомендації та конструктивні параметри інерційно-фільтруючого елемента, отримані в дисертаційній роботі М.М. Аль Раммахі МохаммедАлі "Гідродинамічні характеристики інерційно-фільтруючих сепараторів ", впровадженні при розрахунку газосепаратора продуктивністю 50000 нм³/год працюючого під тиском 1,6 МПа.

Результати математичного моделювання та серії експериментальних досліджень, дослідного варіанту газосепаратору в складі установки для очистки природного газу, проведені здобувачем, представляють науково-практичну цінність у перспективі отримання чистого газового продукту.

У дисертаційній роботі розроблена інженерна методика розрахунку гідродинамічних показників інерційно-фільтруючого газосепаратора.

Запропоновані результати використані для розроблення газосепаратору для Пічівського родовища газу.

Застосування результатів досліджень дозволяє підвищити якість отриманого газового продукту, що призводить до покращення якості товарної фракції.

Голова комісії Головний інженер		/ Вішнівський
Члени комісії: Начальник цеха		/ Кочада К.В.
Майстер		/ Мещеряков А.М.

Приложение Г

Таблица Г. 1

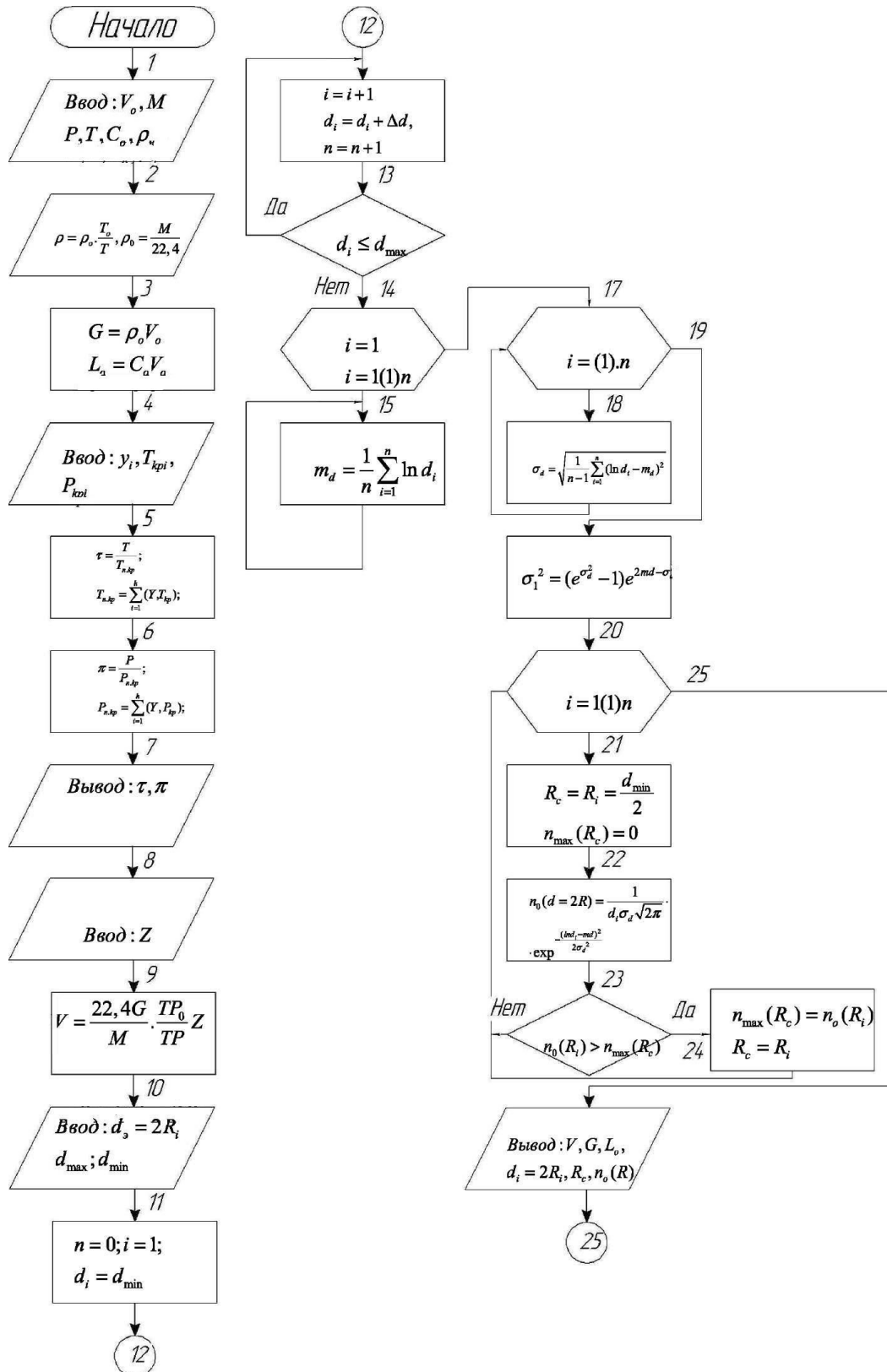
Результаты комплексного исследования канала инерционно-фильтрующего газосепаратора

Вид исследования	Номер гофры	Расход газа, Q, м ³ /с	Расход жидкости, Q, м ³ /с	Концентрация капель, начало гофры, кг/м ³	Концентрация капель, конец гофры, кг/м ³	Эффективность сепарации, %	Минимальный диаметр частиц, мкм	Средний диаметр капель, мкм	Максимальный диаметр капель, мкм	Средняя скорость газа, м/с	Средняя скорость капель, м/с
Моделирование FlowVision	1	0,105	0,000001	0,01	0,007	30	10	30	50	10,2	7,2
	2	0,105	$7,35 \cdot 10^{-7}$	0,007	0,003	70	5	12,5	20	10	7
	3	0,105	$3,15 \cdot 10^{-7}$	0,003	0,0005	95	3	6,5	10	9,2	6,5
	4	0,105	$5,25 \cdot 10^{-8}$	0,0005	0,000006	99,9	0,1	0,55	1	9,2	6,5
Моделирование Cosmos FloWorks	1	0,105	-	-	-	-	-	-	-	8	-
	2	0,105	-	-	-	-	-	-	-	7,5	-
	3	0,105	-	-	-	-	-	-	-	7,4	-
	4	0,105	-	-	-	-	-	-	-	7,4	-
Математическое моделирование	1	0,105	0,000001	0,01	0,0096	8,6	1	75	150	11	8
	2	0,105	0,00000097	0,0096	0,0074	26	1	4	10	10,1	7
	3	0,105	$7,77 \cdot 10^{-7}$	0,0074	0,0000003	99,97	0,5	4	8	9,5	7
	4	0,105	$3,1 \cdot 10^{-10}$	0,0000003	$1 \cdot 10^{-41}$	99,99	0,1	1	2	9,5	7
Экспериментальное исследование	1	0,105	0,000001	0,01	$\sim 1 \cdot 10^{-9}$	99,9	10*	200*	500*	9	-
	2	0,105	-								
	3	0,105	-								
	4	0,105	$\sim 1 \cdot 10^{-9}$								

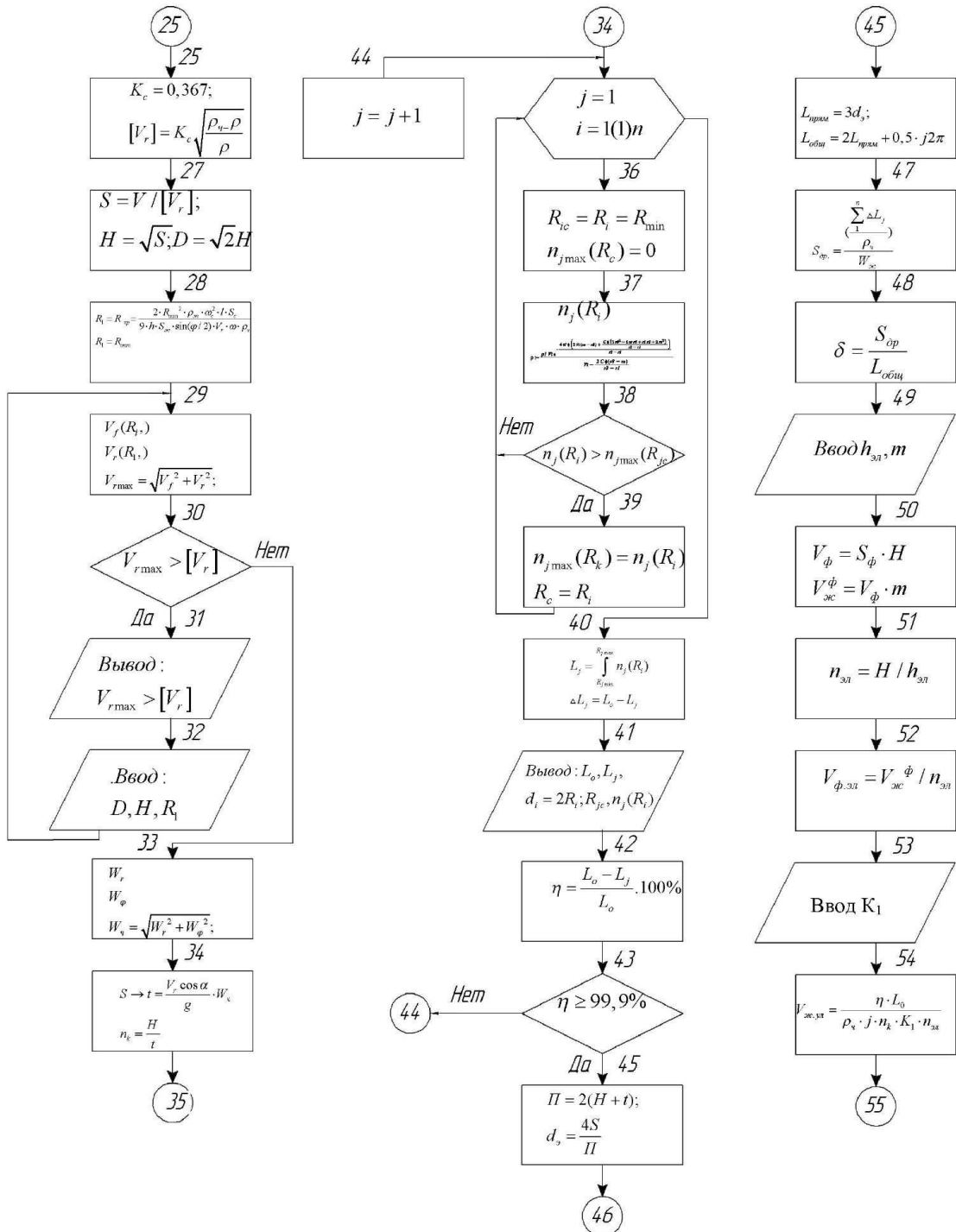
* - согласно технических характеристик форсунки, используемой для распыления.

Приложение Д.

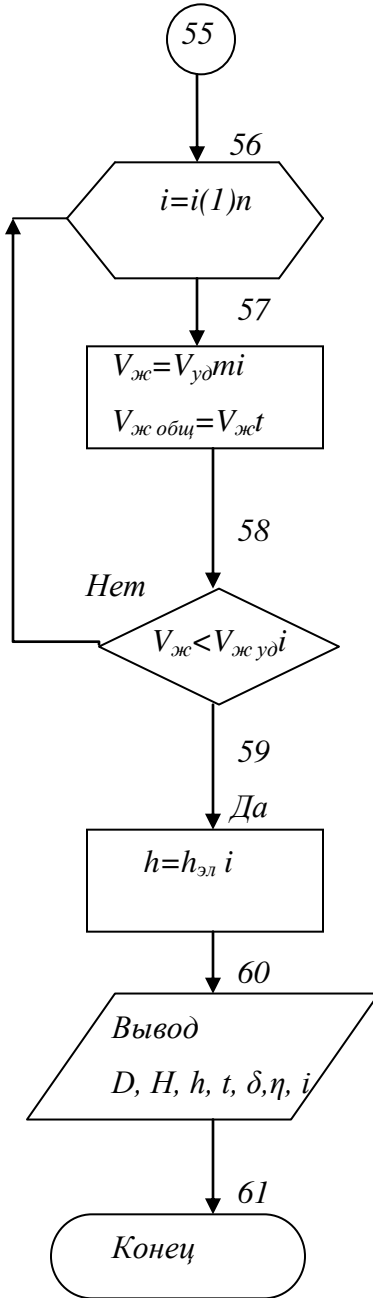
Блок-схема программы расчета инерционно-фильтрующих газосепараторов



Продолжение приложения Д



Продолжение приложения Д



Приложение Е

Листинг программы для расчета инерционно-фильтрующих элементов

restart;

1. Vvod V0,C0,P,T,rho4,M

2. Raschet $\rho_0 = M/22.4$

$\rho = \rho_0 * (T_0 * P) / (T * P_0)$

$T_0 = 273$ $P_0 = 0.1$

3. Raschet $G = \rho_0 * V_0$

$L = C_0 * V_0$

4. Vvod yi, Tkri, Pkri

5. Raschet $t_i = T / T_{kri}$

$P_i = P / P_{kri}$

Продолжение приложения Е

$T_{pkr} = \text{summa}(y_i * T_{kri})$

$P_{pkr} = \text{summa}(y_i * P_{rki})$

6. Vuvod T_{pkr} , P_{pkr}

7. Vvod z (руками по графику)

8. Raschet $V = 22.4 * G * T * \rho_0 * z / (M * T_0 * P)$

9. Vvod d_{max} , d_{min}

10. $n=0$, $i=0$, $d_i = d_{min}$

11. For $i=0$ to n do

$i=i+1$

$d_i = d_1 + \text{deltad}$

$n=n+1$

$d_i \leq d_{max}$

$i=1$ to n

For $i=0$ to n do

$md = (1/n) * (\ln(d_1) + \ln(d_2) + \dots + \ln(d_n))$

18. $\sigma_{mD} = ((1/(n-1)) * ((\ln(d[i] + md)^2)^{0.5}))$

19. $\sigma_{m1} = ((\exp^{\sigma_{mD}^2} - 1) * \exp^2 * (md - \sigma_{mD}^2))$

For $i=0$ to n do

21. $R_c = R[i] = d_{min} - 2$

22. $no = (\exp^{-(\ln(d[i]) - md)^2 / (2 * \sigma_{mD}^2)}) / (d[i] * \sigma_{mD}^{2.51})$

23. $no(R) > n_{max}(R_c)$

25. Vuvod V , G , L_0

$d[i] = 2 * R_i, R_c, n_0(R)$

26. $K_c = 0.367$

$[V_r] = K_c * ((\rho_4 - \rho) / \rho)^{0.5}$

27. $S = V / [V_r]$

$H = s^{0.5}$

$D = 1.41 * H$

28. $R_1 = R_{kr} = (2 * R_{min}^2 * \rho_4 * V_c^2 * l * S_c) / (9 * h * S_g * \sin(\phi/2) * V_r * w * \rho_4)$

Продолжение приложения Е

```

29. Vf=r^2
Vr=phi^2
Vrmax=(Vf^2+Vr^2)^0.5
33/ Wf=r^2
    Wr=phi^2
W4=(Wf^2+Wr^2)^0.5
t=Vr*cos(alpha)*W4/g
nk=H/t
37 rho1=r^2
    For i=0 to n do
40 L[j]=int n[j](R[j])
deltaL[j]=L0-L[j]
42 KPD=100%*(L0-L[j])/Lo
    end
45 P=2*(h+t)
de=4*S/P
    For j=0 to n do
46. Lpram=3*de
        Lobw=2*Lpram+0.5*j*6.28
47. Sdr=(deltaL[j]/rho4)/Wg
Wg=1..5
    while r
48. delta=Sdr/Lobw
50. Vfil=Sfil*H
        Vgfil=Vfil*m
51. nel=H/hel
52. Vfilel=Vgfil/hel
54. Vgul=(Kpd*L0)/(rho4*j*nk*K1*nel)
        For i=0 to n do
57. Vg=Vel*m*i
            Vgulobw=Vgul*i
58. h=i*hel
        end
    end
end

```

Приложение Ж

Листинг программы для определения скорости капель в канале инерционно-фильтрующего сепаратора

```

> restart;
s:=NULL:
s1:=NULL:
sys:={diff(Wr(tau),tau)=Wf(tau)^2/r+psi*Pi*mu*dk/8/m*(Vr(r)-Wr(tau)),diff(Wf(tau),tau)=-
Wr(tau)*Wf(tau)/r+psi*Pi*mu*dk/8/m*(Vf(r)-Wf(tau))}:
K=psi*Pi*mu*dk/8/m:
rho[g]=1.29:
r:=0.08:
psi:=0.44:
dk:=evalf(3*10^(-6)):
rho[K]=1000:
mu:=0.000025:
m:=0.5236*dk^3*rho[K]:
K:=evalf(psi*Pi*rho[g]*dk^2/8/m):phi:=0.00001*Pi:
dphi:=0.06:
for c from 1 to 50 do
C1:=2.173:C2:=-2.063:C3:=1.138:
Vr(r):=((-r^2*C1*sin(2*phi)-r^2*C2*cos(2*phi)-C3)/r):
_C3:=2.835:_C1:=2236:_C2:=2502:
Vf(r):((((r^2*_C1*cos(2*phi)-
r^2*_C2*sin(2*phi))+sqrt((r^4*_C1^2*cos(2*phi)^2+r^4*_C1^2*sin(2*phi)^2+r^4*_C2^2-_C3^2)/r)))):
print(Vf(r)):
sys:={diff(Wr(tau),tau)=Wf(tau)^2/r+K*((Vr(r))-Wr(tau)),diff(Wf(tau),tau)=-
Wr(tau)*Wf(tau)/r+K*(Vf(r)-Wf(tau)),Wr(0)=0.001,Wf(0)=7}:
dsol1 := dsolve(sys, numeric, output=listprocedure,range=0..0.001):dsol1(0.0010):
Wr := subs(dsol1,Wr(tau)): Wf := subs(dsol1,Wf(tau)):
print(Wr(tau),Wf(tau)):
dtau:=0.0010:
deltaSr:=Wr(0.001)*dtau: deltaSphi:=tan(dphi)*r:
r:=r+Wr(0.001)*dtau:
phi:=evalf(phi+dphi):
x:=-r*cos(phi)+0.08:
y:=r*sin(phi):
s:=s,[0.1+x,y]:
s1:=s1,[0.1+x,y]:
unassign(Wr,Wf):
end do:
s2:=NULL:
s3:=NULL:
for m from 0 by 0.001 to 0.36 do
s2:=s2,[m,sqrt(0.08*0.08-(m-0.18)*(m-0.18))]:
s3:=s3,[m,sqrt(0.18*0.18-(m-0.18)*(m-0.18))]:
end do:
print(plot([[s],[s1],[s2],[s3]],style=[point,line,line,line],color=[red,blue,black,black],title="Траектория дв
ижения капли (S), для dk=3 мкм"));

```

Приложение К

Определение коэффициентов С из эксперимента для составляющих скорости газа

Таблица К.1

Радиальная составляющая скорости для гофры 2

Номер замера	1 $\varphi=45^0$		2 $\varphi=60$		3 $\varphi=75^0$		4 $\varphi=90^0$		5 $\varphi=105^0$		6 $\varphi=120^0$		7 $\varphi=135^0$	
	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr
Сечение 1	0,096	3,06	0,096	4,97	0,096	2,45	0,096	-1,12	0,096	-0,23	0,096	-2,43	0,096	-4,6
Сечение 2	0,14	2,32	0,14	0,009	0,14	-4,24	0,14	0,009	0,14	-9,44	0,14	-0,38	0,14	-2,22
Сечение 3	0,17	2,67	0,17	-0,19	0,17	-0,54	0,17	-0,137	0,17	-11,1	0,17	-7,11	0,17	-2,87

Таблица К.2

Коэффициенты для радиальной составляющей скорости

Номер замера	C1	C2	C3
1	1,73	-1,75	-2,85
2	1,65	-2,03	2
3	1,92	-1,88	2,65
4	1,87	-1,933	-2,7
5	1,65	-1,72	2,5
6	1,08	-2,01	2,66
7	1,72	-1,73	2,13
Среднее значение	1,8	-1,86	2,199

$$V_r := \frac{1.8 r^2 \sin(2\varphi) - 1.86r^2 \cos(2\varphi) + 2.199}{r}$$

Продолжение приложения К

Таблица К. 3

Тангенциальная составляющая скорости для гофры 2

Номер замера	1 $\varphi=45^0$		2 $\varphi=60$		3 $\varphi=75^0$		4 $\varphi=90^0$		5 $\varphi=105^0$		6 $\varphi=120^0$		7 $\varphi=135^0$	
	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ
Сечение 1	0,096	11,41	0,096	13,63	0,096	13,85	0,096	1,95	0,096	2,75	0,096	6,69	0,096	9,9
Сечение 2	0,14	13,12	0,14	12,34	0,14	9,14	0,14	11,6	0,14	7,95	0,14	2,21	0,14	4,79
Сечение 3	0,17	9,97	0,17	2,24	0,17	1,49	0,17	1,59	0,17	8,13	0,17	7,13	0,17	7,92

Таблица К.4. Коэффициенты для тангенциальной составляющей скорости

Номер замера	_C1	_C2	_C3
1	2200	2225	3,06
2	2205	2224	3,37
3	2218	2280	5,58
4	2192	2201	3,98
5	2208	2200	3,11
6	2187	2296	3,9
7	2200	2129	3,75
Среднее значение	2229	2219	3,39

$$Vf := 2229r^2 \cos(2\varphi) - 2219r^2 \sin(2\varphi) + \left(\frac{1}{r} (4968441r^4 \cos(2\varphi)^2 + 4968441r^4 \sin(2\varphi)^2 + 4923961r^4 - 11.4921)\right)^{1/2}$$

Продолжение приложения К

Таблица К.5

Радиальная составляющая скорости для гофры 3

Номер замера	1 $\varphi=45^0$		2 $\varphi=60$		3 $\varphi=75^0$		4 $\varphi=90^0$		5 $\varphi=105^0$		6 $\varphi=120^0$		7 $\varphi=135^0$	
	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr
Сечение 1	0,096	8,5	0,096	2,44	0,096	-2,75	0,096	-1,53	0,096	-2,11	0,096	-2,97	0,096	-5,11
Сечение 2	0,14	4,17	0,14	-1,94	0,14	0,01	0,14	1,12	0,14	-7,58	0,14	-7,58	0,14	-3,64
Сечение 3	0,17	3,66	0,17	-5,11	0,17	-6,52	0,17	-4,57	0,17	-6,09	0,17	-7,21	0,17	0,01

Таблица К.6

Коэффициенты для радиальной составляющей скорости

Номер замера	_C1	_C2	_C3
1	1,4	-1,76	2,13
2	1,75	-2,03	2,88
3	1,92	-1,78	2,87
4	1,17	-1,87	2,4
5	1,65	-1,95	2,98
6	1,95	-2,02	3,02
7	1,98	-1,813	2,45
Среднее значение	1,56	-1,878	2,53

$$Vr := \frac{1.56 r^2 \sin(2 \phi) - 1.878 r^2 \cos(2 \phi) + 2.53}{r}$$

Продолжение приложения К

Таблица К.7

Тангенциальная составляющая скорости для гофры 3

Номер замера	1 $\varphi=45^0$		2 $\varphi=60$		3 $\varphi=75^0$		4 $\varphi=90^0$		5 $\varphi=105^0$		6 $\varphi=120^0$		7 $\varphi=135^0$	
	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ
Сечение 1	0,096	4.9	0,096	6.69	0,096	4.8	0,096	4.23	0,096	1.77	0,096	2.98	0,096	6.1
Сечение 2	0,14	10.68	0,14	9.67	0,14	13.33	0,14	12.8	0,14	9.06	0,14	9.06	0,14	10.04
Сечение 3	0,17	10.04	0,17	6.1	0,17	4.57	0,17	8.2	0,17	5.12	0,17	6.06	0,17	8.73

Таблица К.8

Коэффициенты для тангциальной составляющей скорости

Номер замера	C1	C2	C3
1	2222	2217	3,56
2	2213	2213	3,02
3	2245	2211	3,58
4	2235	2285	3,15
5	2187	2202	3,53
6	2211	2025	3,58
7	2225	2247	3,65
Среднее значение	2198	2230	3,42

$$V_f := 2198 r^2 \cos(2\varphi) - 2230 r^2 \sin(2\varphi) + \left(\frac{1}{r} (4831204 r^4 \cos(2\varphi)^2 + 4831204 r^4 \sin(2\varphi)^2 + 4972900 r^4 - 11.6964) \right)^{1/2}$$

Продолжение приложения К

Таблица К.9

Радиальная составляющая скорости для гофры 4

Номер замера	1 $\varphi=45^{\circ}$		2 $\varphi=60$		3 $\varphi=75^{\circ}$		4 $\varphi=90^{\circ}$		5 $\varphi=105^{\circ}$		6 $\varphi=120^{\circ}$		7 $\varphi=135^{\circ}$	
	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr	r	Vr
Сечение 1	0,096	5.04	0,096	-2.9	0,096	-3.84	0,096	-6.86	0,096	-0.97	0,096	-1.84	0,096	-3.43
Сечение 2	0,14	-1.69	0,14	-1.84	0,14	0.06	0,14	-5.39	0,14	-4.9	0,14	-5.7	0,14	-0.75
Сечение 3	0,17	1.75	0,17	-2.3	0,17	-2.09	0,17	-1.77	0,17	0.02	0,17	-3.97	0,17	-1.13

Таблица К.10

Коэффициенты для радиальной составляющей скорости

Номер замера	<u>C1</u>	<u>C2</u>	<u>C3</u>
1	1,52	-1,76	-2,27
2	1,75	-1,5	3,01
3	1,72	-1,85	-2,5
4	2,01	-1,95	2,25
5	1,95	-1,15	2,58
6	1,9	-2.03	2,45
7	1.58	-1.88	-2,13
Среднее значение	1,77	-1,642	2, 56

$$Vr := \frac{1.77 r^2 \sin(2 \phi) - 1.642 r^2 \cos(2 \phi) + 2.56}{r}$$

Продолжение приложения К

Таблица К.11

Тангенциальная составляющая скорости для гофры 4

Номер замера	1 $\varphi=45^0$		2 $\varphi=60$		3 $\varphi=75^0$		4 $\varphi=90^0$		5 $\varphi=105^0$		6 $\varphi=120^0$		7 $\varphi=135^0$	
	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ	r	V φ
Сечение 1	0,096	8.72	0,096	10.8	0,096	10.59	0,096	8.19	0,096	8.81	0,096	9.73	0,096	8.4
Сечение 2	0,14	9.39	0,14	10.52	0,14	8.43	0,14	6.17	0,14	11.22	0,14	10.52	0,14	10.28
Сечение 3	0,17	9.92	0,17	6.33	0,17	3.45	0,17	3.08	0,17	2.76	0,17	6.9	0,17	6.47

Таблица К.12

Коэффициенты для тангениальной составляющей скорости

Номер замера	C1	C2	C3
1	2190	2213	3,03
2	2223	2211	3,1
3	2212	2284	3,23
4	2255	2295	3,13
5	2187	2269	3,45
6	2203	2294	3, 38
7	2199	2264	3,42
Среднее значение	2202	2238	3,28

$$Vf := 2202 r^2 \cos(2 \phi) - 2238 r^2 \sin(2 \phi) + \left(\frac{1}{r} (4848804 r^4 \cos(2 \phi))^2 + 4848804 r^4 \sin(2 \phi)^2 + 5008644 r^4 - 10.7584 \right)^{1/2}$$

Приложение Л

Листинг программы для определения составляющих скорости газа и результат расчёта в канале инерционно-фильтрующего сепаратора. Нахождение скорости V_r :

```

>restart;k:=3.14/4;

K1:=10.52=(0.096^2*_C1*sin(2*k)+0.096^2*_C2*cos(2*k)+_C3)/0.096;
K2:=9.89=(0.126^2*_C1*sin(2*k)+0.126^2*_C2*cos(2*k)+_C3)/0.126;
K3:=5=(0.156^2*_C1*sin(2*k)+0.156^2*_C2*cos(2*k)+_C3)/0.156;

                                k := 0.7850000000

                                K1 := 10.52 = 0.09599996959 _C1 + 0.00007644736425 _C2 + 10.41666667 _C3
                                K2 := 9.89 = 0.1259999600 _C1 + 0.0001003371655 _C2 + 7.936507936 _C3
                                K3 := 5 = 0.1559999505 _C1 + 0.0001242269669 _C2 + 6.410256410 _C3

ГОФРА 1
> sys:={K1,K2,K3};
                                sys := {5 = 0.1559999505 _C1 + 0.0001242269669 _C2 + 6.410256410 _C3, 9.89
                                = 0.1259999600 _C1 + 0.0001003371655 _C2 + 7.936507936 _C3, 10.52
                                = 0.09599996959 _C1 + 0.00007644736425 _C2 + 10.41666667 _C3}

> K4:=solve(sys, {_C1,_C2,_C3});
                                K4 := { _C1 = 5.089868409 1010, _C2 = -6.391681610 1013, _C3 = 0.7827185295}

> assign(%);

Нахождение скорости Vf:
>restart;r1:=0.096;r2:=0.14;r3:=0.17;phi3:=3.14/2;phi1:=phi3;phi2:=phi3;
K1:=(r1^2*_C1*cos(2*phi1)-r1^2*_C2*sin(2*phi1)-
7.36)^2=(r1^4*_C1^2*cos(2*phi1)^2+r1^4*_C1^2*sin(2*phi1)^2+r1^4*_C2^2-_C3^2)/r1;
K2:=(r2^2*_C1*cos(2*phi2)-r2^2*_C2*sin(2*phi2)-
7.72)^2=(r2^4*_C1^2*cos(2*phi2)^2+r2^4*_C1^2*sin(2*phi2)^2+r2^4*_C2^2-_C3^2)/r2;

Продолжение приложения Л

K3:=(r3^2*_C1*cos(2*phi3)-r3^2*_C2*sin(2*phi3)-
10.7)^2=(r3^4*_C1^2*cos(2*phi3)^2+r3^4*_C1^2*sin(2*phi3)^2+r3^4*_C2^2-_C3^2)/r3;

                                r1 := 0.096
                                r2 := 0.14
                                r3 := 0.17

                                phi3 := 1.570000000
                                phi1 := 1.570000000
                                phi2 := 1.570000000

```

Продолжение приложения Л

$$K1 := (-0.009215988311_C1 - 0.00001467788927_C2 - 7.36)^2 = 0.0008847360002_C1^2 + 0.0008847360003_C2^2 - 10.41666667_C3^2$$

$$K2 := (-0.01959997514_C1 - 0.00003121599715_C2 - 7.72)^2 = 0.002743999999_C1^2 + 0.002744000000_C2^2 - 7.142857143_C3^2$$

$$K3 := (-0.02889996335_C1 - 0.00004602766927_C2 - 10.7)^2 = 0.004912999999_C1^2 + 0.004913000000_C2^2 - 5.882352941_C3^2$$

>

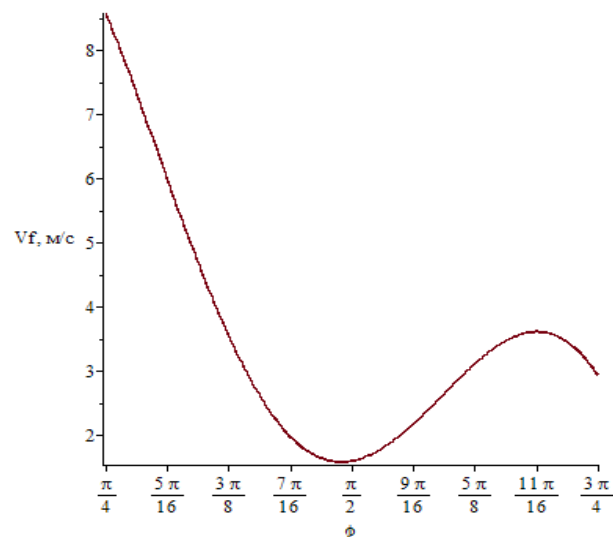
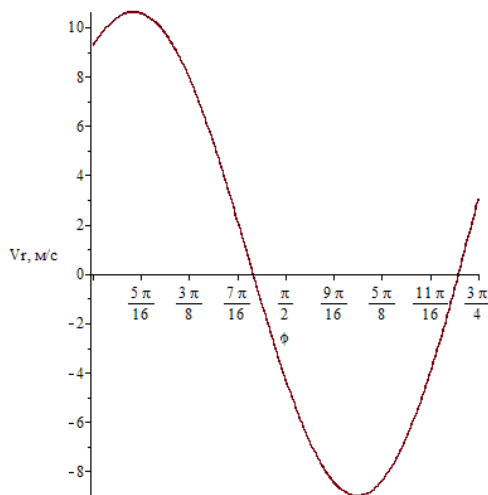
> sys:={K1,K2,K3};

$$\begin{aligned} \text{sys} := & \{ (-0.02889996335_C1 - 0.00004602766927_C2 - 10.7)^2 = 0.004912999999_C1^2 \\ & + 0.004913000000_C2^2 - 5.882352941_C3^2, (-0.01959997514_C1 \\ & - 0.00003121599715_C2 - 7.72)^2 = 0.002743999999_C1^2 + 0.002744000000_C2^2 \\ & - 7.142857143_C3^2, (-0.009215988311_C1 - 0.00001467788927_C2 - 7.36)^2 \\ & = 0.0008847360002_C1^2 + 0.0008847360003_C2^2 - 10.41666667_C3^2 \} \end{aligned}$$

> K4:=solve(sys, {_C1,_C2,_C3});> assign(%);

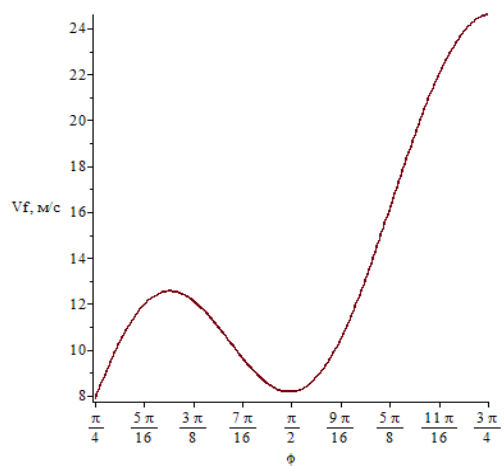
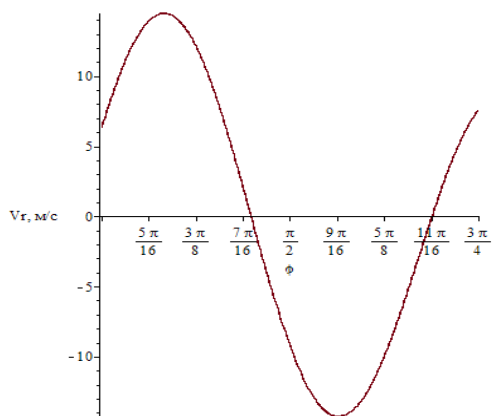
Результаты построения графиков скорости в гофрах при $r=0,14$ м :

Гофра 1

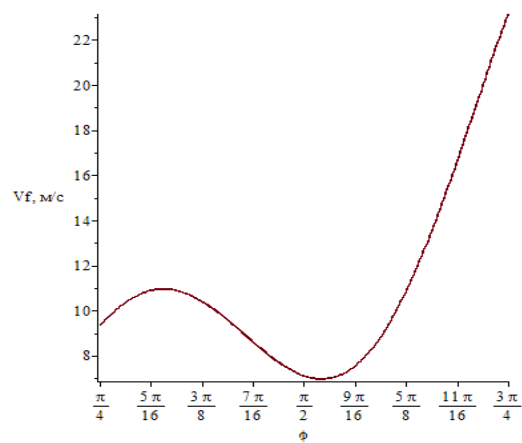
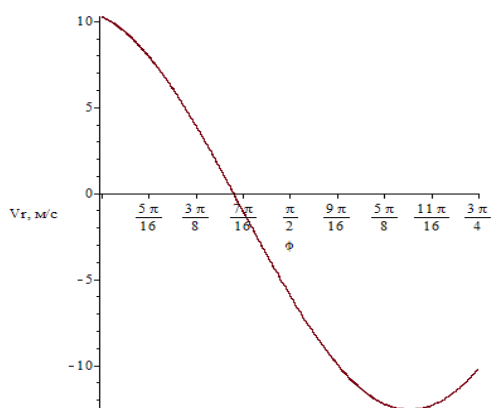


Продолжение приложения Л

Гофра 2



Гофра 3



Гофра 4

