

**М.М. Башаров, О.А. Сергеева**

# **УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНОВ**

**Учебное пособие**



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**М.М. Башаров, О.А. Сергеева**

# **УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНОВ**

**Учебное пособие  
Под редакцией А.Г. Лаптева**

Казань 2012

УДК 66.063.62

ББК 35.11

Б 33

Рецензенты: В.Л. Федяев – д.т.н., профессор

М.И. Фарахов – д.т.н., профессор

Б 33

М.М. Башаров, О.А. Сергеева

Устройство и расчет гидроциклонов: учебное пособие. Под ред. А.Г. Лаптева. –

Казань: Вестфалика, 2012 – 92 с.

В учебном пособии представлены общие сведения о процессах разделения неоднородных систем. Подробно рассмотрены конструкции и принцип действия гидроциклонов. Представлены полуэмпирические математические модели и методы расчета процессов очистки жидкостей от дисперсной фазы. Даны примеры расчетов.

Учебное пособие предназначено для студентов технологических специальностей, а так же может быть полезным аспирантам и специалистам химической технологии.

## ВВЕДЕНИЕ

Разделение гетерогенных систем осуществляется под действием различных сил. Действующая сила определяет конструкцию аппарата и область его применения. Разделение в гидроциклоне, в основном, происходит под действием центробежных сил.

Гидроциклоны успешно применяются во многих отраслях промышленности и показывают хорошие результаты. Их достоинством являются небольшие размеры, эффективность работы, несложная конструкция и возможность объединения аппаратов в один большой комплекс (мультигидроциклон). Но в таком простом по конструкции аппарате протекает сложный гидродинамический процесс. Режим течения жидкости в аппарате носит турбулентный характер, поэтому возникает явление, называемое турбулентная диффузия, которая сильно влияет на разделяющую способность гидроциклона. Поэтому необходимой задачей является расчет эффективности турбулентной сепарации гидроциклона при разделении дисперсных сред.

Под действием центробежных сил так же происходит разделение в центрифугах и сепараторах, но они сильно отличаются по конструкции от гидроциклонов, хотя бы тем, что у последних отсутствуют движущиеся части. Еще необходимо различать циклоны и гидроциклоны. Циклоны применяются для улавливания пыли и очистки газов, а гидроциклоны – для очистки суспензий.

Гидроциклоны предназначены для классификации и обогащения в водной среде тонкоизмельченных материалов по крупности, для сгущения и дешламации продуктов обогащения.

Классификаторы применяются для разделения зёрен по крупности, сгустители – для отделения части воды от зёрен и сепараторы – для обогащения полезных ископаемых в минеральных суспензиях [1].

## ГЛАВА 1

# ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТЕЙ ОТ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

### 1.1 Классификация неоднородных систем

Дисперсная (гетерогенная) система – это системы, состоящие из двух и более фаз, которые могут быть разделены механическим путем. Неоднородные системы состоят из дисперсной, т.е. распределенной, внутренней фазы и дисперсной среды – сплошной, внешней среды, в которой во взвешенном состоянии находятся частицы дисперсной фазы [40].

Разновидности дисперсных систем представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Разновидности дисперсных систем

Название дисперсной системы	Дисперсная фаза	Дисперсная среда
суспензии	взвешенные твердые частицы	жидкость
эмульсии	взвешенные капли другой жидкости	жидкость
пены	газовые пузырьки	жидкость
аэрозоли (дымы и пыли)	взвешенные твердые частицы	газ
туманы	взвешенные капли жидкости	газ

Суспензии могут быть классифицированы в зависимости от размеров частиц дисперсной фазы (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Классификация суспензии в зависимости от размера взвешенных твердых частиц

Вид суспензии	Размер твердых частиц, мкм
грубые	более 100
тонкие	от 0,5 до 100
мути	от 0,1 до 0,5
коллоидные растворы	менее 0,1

Для большинства технологических процессов необходимо разделение дисперсных систем. В зависимости от типа дисперсной системы можно использовать разделение следующими методами: отстаивание, фильтрование, центрифугирование и флотация.

## 1.2 Отстаивание

Если плотность дисперсной фазы больше плотности дисперсионной среды, то взвешенные частицы под действием силы тяжести оседают на дно. Если же плотность взвешенных частиц меньше плотности жидкости, то они всплывают вверх под действием силы, которая определяется по закону Архимеда. Осаждение взвешенных частиц в поле силы тяжести называется отстаиванием (или седиментацией). Оно с давних времен используется для разделения неоднородных систем.

Скорость процесса отстаивания является основным технологическим фактором, определяющим его эффективность. Она зависит от скорости осаждения взвешенных частиц, а для ее определения необходимо знать законы движения частиц в жидкости: скорость движения частиц и силу сопротивления, возникающую при движении частиц в зависимости от их плотности, размера и формы, а также от физических свойств дисперсионной среды.

Изучению закономерностей движения частиц в жидкости посвящено большое число теоретических работ, в которых использованы обширные экспериментальные результаты многих исследователей. Сейчас наиболее полно изучены закономерности свободного осаждения плотных частиц, которые в процессе осаждения не слипаются, не изменяют своей формы и размеров.

Идеальный случай свободного осаждения может иметь место в бесконечно большом объеме жидкости при движении в нём одной частицы. Можно считать, что закономерности свободного осаждения соблюдаются с достаточной степенью точности, если объемная концентрация осаждающихся частиц не превышает 0,5-1,0%.

Точное решение задачи о свободном движении частицы в жидкости было найдено теоретическим путем Габриэлем Стоксом на основе решения дифференциальных уравнений гидродинамики применительно к частному случаю движения шара очень малого размера с малой скоростью. Формула, полученная Стоксом, имеет следующий вид:

$$F = -3\pi\mu dV, \quad (1.1)$$

где  $F$  – сила сопротивления, Н;  $\mu$  – вязкость жидкости, Па·с;  $d$  – диаметр частицы, м;  $V$  – скорость движения частицы, м/с.

Уравнение (1.1), называемое законом Стокса, определяет силу сопротивления, которую испытывает частица при перемещении в жидкости. Это уравнение выведено при пренебрежении влиянием инерционных сил. Поэтому, закон Стокса справедлив только для частиц малого размера, движущихся с малой скоростью, когда на сопротивление движению влияют только силы вязкости.

Увеличение размера и скорости движения частиц приводит к возникновению турбулентности при обтекании движущейся частицы жидкостью. В этом случае на движущуюся частицу начинают действовать инерционные силы, что приводит к нарушению линейности в законе Стокса. Рядом исследователей были предприняты попытки учесть влияние инерционных сил. Однако все решения задачи о движении тела в жидкости получены при некоторой схематизации физической картины и оказываются справедливыми в отдельных областях значений скоростей и размеров тел.

Наиболее известным следует считать представление закона сопротивления в таком виде:

$$F = \xi \rho_{\text{ж}} d^2 V^2, \quad (1.2)$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления,  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $d$  – диаметр частицы (вычисляют как диаметр равновеликого по объему шара), м.

При осаждении частиц в жидкости их движение можно рассматривать как равномерное. Это подтверждается опытом. Следовательно, силы, действующие на частицу, уравновешены. Этими силами являются сила сопротивления, сила тяжести и подъемная сила. Сила тяжести равна весу частицы в воздухе:

$$G_1 = \rho_{\text{ч}} g V_{\text{ч}}, \quad (1.3)$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частицы (дисперсной фазы),  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  $V_{\text{ч}}$  – объем частицы,  $\text{м}^3$ .

Подъемная сила – это вес жидкости в объеме частицы:

$$G_2 = -\rho_{\text{ж}} g V_{\text{ч}}. \quad (1.4)$$

Движущей силой процесса осаждения является вес частицы в жидкости:

$$G = (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) g V_{\text{ч}}. \quad (1.5)$$

Сила  $G$  при равномерном движении частицы уравнивается силой сопротивления. Приравняв силу сопротивления (1.2) к весу частицы в жидкости (1.5), получим выражение для вычисления скорости осаждения сферической частицы в жидкости:

$$V = \sqrt{\frac{\pi (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{6 \rho_{\text{ж}}} g \frac{d}{\xi}} \quad (1.6)$$

Коэффициент сопротивления  $\xi$  зависит от числа Рейнольдса. Как показали экспериментальные исследования, эта зависимость при значениях  $Re < 1$  подчиняется линейному закону сопротивления. С увеличением скорости осаждения и размера частиц линейность закона нарушается. На рис. 1.1. представлена зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса. Из графика видно, что существует три различных режима движения, каждому из которых соответствует определённый характер зависимости  $\xi = y(Re)$ :

- ламинарный режим ( $Re < 1$ ) –  $\xi = 24/Re$  (закон Стокса);
- переходный режим ( $Re = 1 \div 500$ ) –  $\xi = 18,5/Re^{0,66}$ ;
- автомодельный режим ( $Re > 500$ ) –  $\xi = 0,44$  (закон Ньютона).

Для переходной области предлагается множество формул, аппроксимирующих кривую Релея. Наиболее часто используемые:

$$\xi = \frac{24}{Re} + 4Re^{-1/3}, \quad (3 < Re < 400), \quad (1.7)$$

$$\xi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4, \quad (0,2 < Re < 500). \quad (1.8)$$

Если необходимо вычислить скорость осаждения частиц малого размера ( $Re < 1$ ), то вместо формулы (1.6) можно применять формулу Стокса, записываемую в следующем виде:

$$V = \frac{1}{18} \frac{(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}})}{\rho_{\text{ж}}} g d^2. \quad (1.9)$$

При движении частиц в ограниченном объеме, когда они соприкасаются одна с другой из-за большой их концентрации, скорость осаждения будет меньше скорости свободного движения в  $k$  раз:



$$k = \sqrt{20,25C^2 + (1 - C)^3} - 4,5C, \quad (1.10)$$

где  $C$  – объёмная концентрация дисперсной фазы в системе.

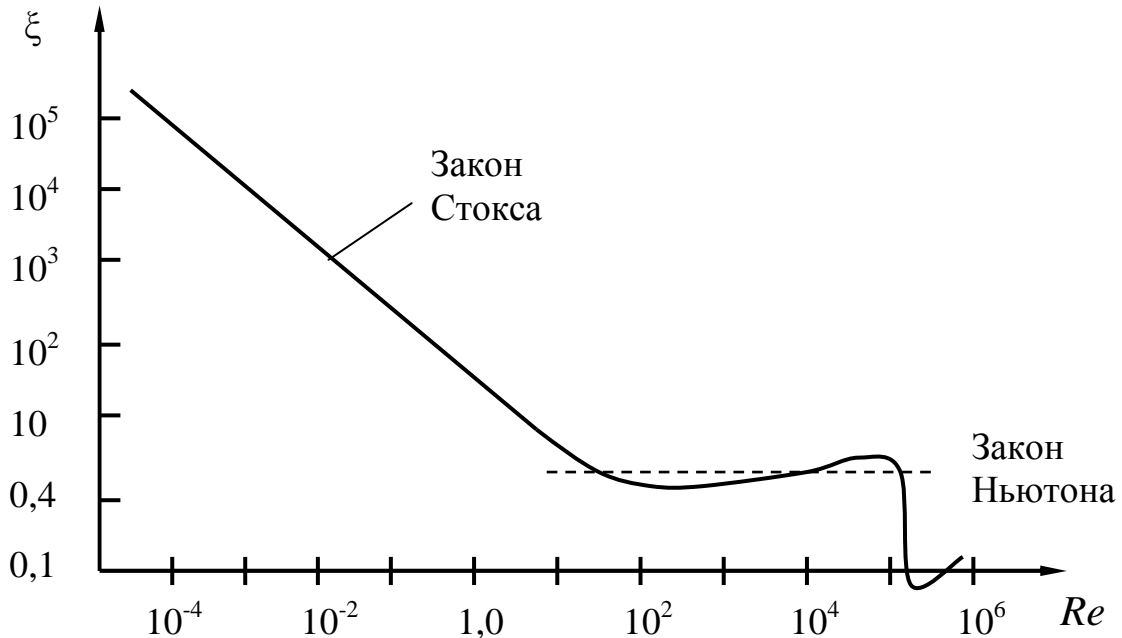


Рисунок 1.1 – Зависимость  $\xi$  от критерия  $Re$

При расчете скоростей для частиц неправильной формы, отличной от формы шара, необходимо пользоваться эквивалентным диаметром, который определяют по формуле:

$$d_{\text{эkv}} = 1,24 \left( \frac{G}{\rho_{\text{ч}} g} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1.11)$$

При этом необходимо учитывать, что чем больше форма частицы отличается от формы шара, тем больше будет отличаться теоретически вычисленная скорость частицы от её фактической, которую можно определить экспериментальным путем. Скорость реальных частиц меньше скорости частиц, имеющих форму правильного шара.

Разделение неоднородных систем отстаиванием осуществляют в аппаратах, называемых отстойниками. Они бывают как периодического, так и непрерывного действия. Последние строят также двухъярусными или многоярусными. Каждый ярус работает как самостоятельный отстойник.

Необходимую поверхность осаждения находят из простого выражения:

$$F = \frac{V_{\text{осв}}}{V}. \quad (1.12)$$

где  $V_{\text{осв}}$  – объемный расход осветленной жидкости, м<sup>3</sup>/с.

Для интенсификации процесса необходимо вести отстаивание при повышенных температурах, так как с повышением температуры увеличивается скорость движения частиц за счет снижения вязкости. При этом необходимо иметь в виду, что с повышением температуры в жидкости усиливаются конвективные потоки, которые могут препятствовать осаждению малых частиц. Для устранения нежелательных конвективных потоков в отстойники устанавливают специальные сепарирующие элементы.

Производительность отстойников определяется скоростью осаждения частиц, т. е. продолжительностью процесса отстаивания, которую можно уменьшать за счет уменьшения высоты отстойников. В результате получают отстойники с небольшой высотой и значительной поверхностью осаждения.

### 1.3 Фильтрование

Фильтрованием называют процесс разделения неоднородных систем в искусственно созданных условиях с помощью пористых перегородок. Процесс разделения в естественных условиях при движении жидкости через пористые грунты называют фильтрацией. Суспензии разделяют фильтрованием в тех случаях, когда взвешенные частицы слишком медленно осаждаются или когда необходимо выделить твёрдую фазу, содержащую минимальное количество жидкости.

При фильтровании жидкость должна проходить через пористую перегородку, которая оказывает движению жидкости гидравлическое сопротивление. Чтобы жидкость могла преодолевать это сопротивление и проходить через поры фильтровальной перегородки, с обеих сторон перегородки создают разность давлений. Скорость процесса фильтрования пропорциональна разности давлений, которую создают обычно при помощи поршневых и центробежных насосов. Для этой цели можно использовать также гидростатическое давление обрабатываемой суспензии. Кроме фильтров, в которых разность давлений создают с помощью гидростатического давления столба фильтруемой жидкости, различают еще вакуум-фильтры. В них разность давлений создают с помощью компрессоров.

Твёрдые частицы, содержащиеся в суспензии, задерживаются на поверхности перегородки и образуют слой осадка. Этот процесс называется фильтрованием с образованием осадка. Иногда твёрдые частицы проникают в

поры фильтровальной перегородки и задерживаются там, не образуя осадка. Такой процесс называют фильтрованием с закупориванием пор. Наиболее желательно фильтрование с образованием осадка, когда закупоривание пор фильтровальной перегородки твёрдыми частицами с соответствующим увеличением её сопротивления почти не происходит.

В начальный момент фильтрования гидравлическое сопротивление зависит от величины пор фильтрующей перегородки. По мере увеличения слоя осадка растёт и его гидравлическое сопротивление. Вначале осадок играет положительную роль, как дополнительный слой фильтрующей среды. Чтобы уменьшить гидравлическое сопротивление слоя осадка, его периодически или непрерывно удаляют. От гидравлического сопротивления слоя осадка и пористой перегородки зависит скорость фильтрования, которая при прочих равных условиях обратно пропорциональна гидравлическому сопротивлению.

Обычно ввиду небольшого размера пор в слое осадка и фильтровальной перегородке, а также малой скорости движения жидкой фазы в порах можно считать, что фильтрование протекает в ламинарной области. При таком условии скорость фильтрования в каждый данный момент времени прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости жидкой фазы и общему гидравлическому сопротивлению слоя осадка и фильтровальной перегородки. Переменную скорость фильтрования выражают в дифференциальной форме:

$$W = \frac{dV}{Sd\tau} \quad (1.13)$$

В соответствии с вышеизложенным, основное дифференциальное уравнение фильтрования имеет вид:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{oc} + R_{фп})} \quad (1.14)$$

где  $V$  – объём фильтрата, м<sup>3</sup>;  $S$  – поверхность фильтрования, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  $\Delta p$  – разность давлений, Па;  $\mu$  – вязкость суспензии, Па·с;  $R_{oc}$  и  $R_{фп}$  – сопротивление слоя осадка и фильтровальной перегородки соответственно.

Сопротивление слоя осадка можно выразить равенством:

$$R_{oc} = r_o h_{oc} = r_o x_o \frac{V}{S}, \quad (1.15)$$

где  $r_o$  – удельное объёмное сопротивление слоя осадка;  $h_{oc}$  – толщина слоя осадка, м.

Приняв  $V=0$ , что соответствует началу фильтрования, когда на фильтровальной перегородке ещё не образовался слой осадка, из уравнения (1.14) получают сопротивление фильтровальной перегородки:

$$R_{фп} = \frac{\Delta p}{\mu W}. \quad (1.16)$$

Таким образом, известны следующие уравнения фильтрования:

- при постоянной разности давлений ( $\Delta p = const$ ):

$$\int_0^V \mu \left( r_o x_o \frac{V}{S} + R_{фп} \right) dV = \int_0^\tau \Delta p S dt, \quad (1.17)$$

$$\mu r_o x_o \frac{V^2}{2S} + \mu R_{фп} V = \Delta p S \tau \quad \text{или} \quad (1.18)$$

$$V^2 + 2 \frac{RS}{r_o x_o} V = 2 \frac{\Delta p S^2}{\mu r_o x_o} \tau; \quad (1.19)$$

- при постоянной скорости ( $V = const$ ):

$$\Delta p = \mu r_o x_o \frac{V^2}{S^2 \tau} + \mu R_{фп} \frac{V}{S} = \mu r_o x_o W^2 \tau + \mu R_{фп} W; \quad (1.20)$$

- при постоянной разности давлений и скорости ( $\Delta p = const; V = const$ ):

$$V = \frac{\Delta p S}{\mu (r_o x_o + R_{фп})} \tau. \quad (1.21)$$

В качестве фильтровальных перегородок в настоящее время применяют бумагу, картон, хлопчатобумажные и шерстяные ткани, ткани из синтетических волокон, сетки из волосяных или металлических нитей, зернистые слои песка,

диатомита и угля, пористые перегородки из кварца, шамота, спекшегося стеклянного или металлического порошка, а также из твёрдой резины. Средний размер и форма пор фильтровальных перегородок зависит от величины и формы элементов указанных материалов.

При выборе материала для фильтрующей перегородки учитывают следующие основные факторы: химические свойства обрабатываемой суспензии; необходимую разность давлений по обе стороны перегородки; степень дисперсности твёрдых частиц суспензии; производительность. Аппараты, предназначенные для фильтрования, называют фильтрами; их изготавливают периодического и непрерывного действия. В зависимости от вида фильтрующей перегородки, фильтры разделяют на три группы: с зернистой, тканевой и жесткой перегородками.

## 1.4 Центрифугирование

Под центрифугированием понимают процесс разделения неоднородных систем, суспензий и эмульсий, в поле центробежных сил с использованием сплошных или проницаемых для жидкости перегородок. В аппаратах со сплошными стенками производят разделение суспензий и эмульсий по принципу отстаивания, причём действие силы тяжести заменяется действием центробежной силы. В аппаратах с проницаемыми стенками осуществляется процесс разделения суспензий по принципу фильтрования, причём вместо разности давлений используется действие центробежной силы.

Разделение неоднородных систем центрифугированием, с физической точки зрения, можно рассматривать как процесс свободного или стесненного осаждения взвешенных частиц в жидкости под действием центробежного силового поля. Взвешенные частицы могут быть твёрдыми или жидкими. В первом случае процесс осуществляют в центрифугах, а во втором – в сепараторах.

Центробежная сила возникает при вращении центрифуги и находящейся в ней жидкости. Она возникает, как сила инерции при вращательном движении тел, и направлена всегда по радиусу от оси вращения к периферии. Если обозначить:  $G$  – вес вращающегося тела;  $r$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести тела;  $\omega$  – угловая скорость вращения, то центробежную силу  $C$  можно определить следующим уравнением:

$$C = G \frac{\omega^2 r}{g} = GFr, \quad (1.22)$$

где  $\frac{\omega^2 r}{g} = Fr$  – критерий Фруда. Он определяется центробежной силой, развиваемой 1 кг веса тела, и называется фактором разделения.  $Fr$  показывает во сколько раз центробежная сила больше силы тяжести.

По величине фактора разделения центрифуги можно условно разделить на две группы: нормальные центрифуги ( $Fr < 3500$ ) и сверх центрифуги ( $Fr > 3500$ ).

Центробежная сила пропорциональна величине радиуса  $r$  и квадрату числа оборотов. Поэтому ее увеличивать целесообразнее за счет увеличения числа оборотов, а не за счет увеличения радиуса. На повышение давления одинаково влияют и рост числа оборотов, и удлинение радиуса  $r$ .

Произведение фактора разделения  $Fr$  на поверхность осаждения твёрдой фазы в роторе центрифуги  $S$  называется индексом производительности центрифуги и обозначается  $\Sigma$ :

$$\Sigma = FrS. \quad (1.23)$$

Индекс производительности  $\Sigma$  численно равен поверхности осаждения отстойника, в котором достигается та же производительность, что и в центрифуге. Величина  $\Sigma$  характеризует влияние конструктивных факторов на способность центрифуги разделять данную неоднородную систему.

Центрифугирование применяют для разделения суспензий, шламов, эмульсий и растворов. Разделение технических суспензий производится как по принципу отстаивания в сплошных барабанах, так и по принципу фильтрования в перфорированных барабанах.

Центрифугирование в отстойных барабанах – это технологический процесс, включающий две основные стадии: 1) осаждение твердой фазы и 2) уплотнение осадка. Обычно этот процесс применяют для разделения суспензий с мелко и среднезернистой твёрдой фазой. При этом, можно очищать жидкости как от загрязнений, содержащихся в больших количествах (центробежное отстаивание), так и от незначительного количества твёрдой фазы (центробежное осветление).

Центробежное отстаивание в большинстве случаев не дает хорошего разделения. После центрифугирования получают более или менее загрязненный фугат и влажный осадок. Относительно большое содержание твёрдой фазы в суспензиях не позволяет в производственных условиях применять скоростные центрифуги.

В отличие от центробежного отстаивания центробежное осветление применяют главным образом для очистки жидкости от тонких суспензий и от коллоидных частиц. Центрифугирование в сплошных роторах применяют

также для разделения эмульсий. Под действием поля центробежных сил компоненты эмульсии в барабане располагаются в виде концентрических слоёв: наружного слоя более тяжелой жидкости и внутреннего слоя жидкости, имеющего меньшую плотность. Жидкость из слоёв выводится наружу порознь.

Разделение суспензий и шламов в перфорированных барабанах, покрытых изнутри пористой тканью, называют центробежным фильтрованием. На фильтрующей ткани оседает твёрдая фаза, а жидкость проходит сквозь поры осадка и ткани и удаляется наружу через отверстие в барабане. Центробежное фильтрование можно рассматривать как процесс, включающий следующие три стадии:

- 1) фильтрование с образованием осадка;
- 2) отжим жидкости и уплотнение осадка;
- 3) удаление из осадка жидкости, удерживаемой в местах соприкосновения частиц и на их поверхности.

Для отделения от жидкости дисперсной фазы, находящейся в ней в состоянии тонкого измельчения (желатин, клей и др.), применяют центрифуги, в которых барабан вращается с повышенной скоростью – до 40 тыс. об/мин. Такие аппараты, называемые сверхцентрифугами, применяют, например, для выделения жира из промывных вод и для извлечения воды из минеральных масел.

## 1.5 Флотация

Флотацией называют процесс всплывания в жидкой среде частиц дисперсной фазы с прилипшими к ним пузырькам газа [28-30]. Для практических целей этот процесс был впервые применен в 1877г. при обогащении графитовых руд. Однако вспомнили о нем только в 1898г., в связи с внедрением изобретения Эльмора. В 1901г. флотацию впервые применили для обогащения руд в больших промышленных масштабах.

В настоящее время флотационный способ широко используют для обогащения и разделения руд различных металлов, твердого топлива и неметаллических полезных ископаемых. Кроме того, флотацию применяют для выделения взвешенных частиц из водных растворов, а также для очистки сточных вод.

Наибольшее распространение процессы флотации получили при обогащении полезных ископаемых. Здесь они наиболее полно изучены экспериментально и теоретически. Перед флотационным обогащением руду измельчают. Полученный порошок смешивают с водой, в результате чего образуется неоднородная система, называемая пульпой. В пульпу вводят флотационные реагенты: собиратели, регуляторы и пенообразователи.

Собиратели придают твёрдым частицам способность прилипать к пузырькам газа. Регуляторы обеспечивают избирательность. Они усиливают прочность прилипания пузырьков или, наоборот, подавляют эту способность у определенного вида частиц. Пенообразователи повышают дисперсность газовых пузырьков и устойчивость пены.

Поверхность частиц ценных минералов и частиц породы имеет разные физико-химические свойства. После воздействия на пульпу реагентов это различие проявляется в способности одних частиц хорошо смачиваться водой, а других прилипать к пузырькам газа. Если затем вводить в пульпу тем или иным способом пузырьки воздуха, то частицы руды будут увлекаться ими вверх на поверхность в виде пены, которую направляют в специальные отстойники. Когда при обогащении полезных ископаемых флотируют частицы ценного минерала, а частицы пустой породы остаются в пульпе (камерный продукт), то в этом случае процесс обогащения называют прямой флотацией. Если, наоборот, в пенный продукт переходит пустая порода, а ценный минерал остается в пульпе, то такой процесс обогащения полезных ископаемых называют обратной флотацией.

Различают *пенную*, *пленочную*, *масляную* и другие виды флотации. Наибольшее распространение в промышленности получила пенная флотация. Необходимыми условиями пенной флотации являются способность твердой частицы прилипать к пузырьку газа в воде, и способность пульпы образовывать устойчивую пену. Стабильность и продолжительность существования пены снижается с увеличением размера пузырьков и с ростом температуры пульпы. В свою очередь, размеры пузырьков зависят от поверхностного натяжения жидкости на границе с газообразной фазой. Образованию устойчивой пены, кроме понижения поверхностного натяжения, благоприятствует также увеличение вязкости жидкости. Изменение вязкости не оказывает влияния на дисперсность пузырьков. Так, например, изменение вязкости даже в 100 раз не оказывает существенного влияния на размер пузырьков.

*Пленочная флотация* была предложена в 1892г., но до сих пор не нашла широкого применения. Сущность ее заключается в том, что измельченную руду обрабатывают реагентами и насыпают с небольшой высоты на поверхность воды. Не смачиваемые частицы остаются на поверхности воды, а остальные переходят в жидкую фазу и оседают вниз.

*Масляная флотация* представляет собой процесс всплывания агрегатов частиц, включенных в масляные оболочки. С этой целью измельченную руду смешивают с водой, в которой находится диспергированное жидкое масло. Необходимым условием обогащения полезных ископаемых с помощью масляной флотации является избирательное смачивание минеральных частиц жидким маслом.



Одним из вариантов флотационного метода разделения неоднородных систем является *ионная флотация*. Возможность флотации ионов и молекул из растворов с помощью пузырьков газа известна сравнительно давно. Однако этот способ приобрел важное значение только после того, как для его осуществления было предложено использовать флотационные реагенты. Как правило, для ионной флотации применяют собиратели, которые представляют собой высокоповерхностно-активные вещества. Собиратель электростатически притягивает ионы к поверхности пузырька или же связывает их в координационное или любое другое поверхностно-активное соединение.

Достоинством ионной флотации является высокая степень селективности. Так, при соответствующих условиях представляется возможным разделить ионы различных элементов, имеющие одинаковые по величине и знаку заряды. Для ионной флотации характерно образование тонкого слоя неустойчивой пены, стабилизированной малорастворимыми адсорбционными слоями. Такая пена разрушается в разделительном аппарате, превращаясь в так называемую пенку – плохо растворимый гидрофобный продукт, в котором концентрируется извлекаемое из раствора вещество.

Ионная флотация находит применение при очистке сточных вод и для извлечения металлов из разбавленных растворов. Перспективным направлением является также использование ионной флотации для извлечения из морской воды растворенных в ней ценных веществ. Как выяснилось, флотационные методы извлечения ионов и молекул из растворов наиболее перспективны при низкой концентрации вещества, меньше  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  моль/л.

Большой интерес в силу своей универсальности, высокой производительности и эффективности представляет метод флотации при очистке сточных вод промышленных предприятий [20,31,36,38]. Долгое время флотация, как метод очистки сточных вод от нерастворимых загрязнений, не находила широкого распространения. В прошлом этот метод успешно использовался в бумажной промышленности. Позднее его стали применять в основном на нефтепромысловых и нефтеперерабатывающих предприятиях и там, где сточные воды содержат отходы нефти, смолы и продукты её переработки. В последнее время интерес к практическому использованию флотации сильно возрос. Исследована и доказана возможность очистки флотацией сточных вод целого ряда предприятий, таких как заводы искусственного волокна, кожевенные, механические, пищевые комбинаты, а также предприятий энергетического комплекса и др.

При незначительном времени пребывания сточных вод во флотационных установках (20-40 минут) обеспечивается высокий эффект очистки от нерастворимых примесей и взвешенных веществ. Это предопределило перспективность метода и возможность его использования для очистки

сточных вод как промышленных, так и бытовых. Очистка флотацией сточных вод сопровождается одновременно такими явлениями, как аэрация, снижение концентрации поверхностно-активных веществ, бактерий и микроорганизмов, что способствует дальнейшей очистке сточных вод, улучшает их общее санитарное состояние, а иногда может иметь самостоятельное значение и явиться решающим фактором при выборе метода водоочистки[1].

#### **Контрольные вопросы:**

1. Виды неоднородных систем.
2. Как классифицируются суспензии по размерам частиц?
3. Сущность процесса отстаивания.
4. Как определить скорость осаждения частиц?
5. Что такое коэффициент сопротивления частицы? Как он зависит от числа Рейнольдса?
6. Для чего применяется фильтрация? Скорость фильтрации.
7. Понятие процесса центрифугирования.
8. Сущность процесса флотации. Виды флотации.

## ГЛАВА 2

### ПРИНЦИП РАБОТЫ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Разделение гетерогенных систем осуществляется под действием различных сил. Действующая сила определяет конструкцию аппарата и область его применения. Разделение в гидроциклоне, в основном, происходит под действием центробежных сил.

Гидроциклоны успешно применяются во многих отраслях промышленности и показывают хорошие результаты. Их достоинством являются небольшие размеры, эффективность работы, несложная конструкция и возможность объединения аппаратов в один большой комплекс (мультигидроциклон). Но в таком простом по конструкции аппарате протекает сложный гидродинамический процесс. Режим течения жидкости в аппарате носит турбулентный характер, поэтому возникает явление, называемое турбулентная диффузия, которая сильно влияет на разделяющую способность гидроциклона. Поэтому необходимой задачей является расчет эффективности турбулентной сепарации гидроциклона при разделении дисперсных сред.

Под действием центробежных сил так же происходит разделение в центрифугах и сепараторах, но они сильно отличаются по конструкции от гидроциклонов, хотя бы тем, что у последних отсутствуют движущиеся части. Еще необходимо различать циклоны и гидроциклоны. Циклоны применяются для улавливания пыли и очистки газов, а гидроциклоны – для очистки суспензий.

Гидроциклоны предназначены для классификации и обогащения в водной среде тонкоизмельченных материалов по крупности, для сгущения и дешламации продуктов обогащения.

Классификаторы применяются для разделения зёрен по крупности, сгустители – для отделения части воды от зёрен и сепараторы – для обогащения полезных ископаемых в минеральных суспензиях [5, 42].

#### 2.1 Движение твердых частиц в гидроциклоне

В гидроциклонах, когда в него тангенциально поступает разделяемая смесь через входной патрубок и приобретает круговое движение, возникают значительные центробежные силы, которые во много раз превышают силу тяжести, и под действием которых более тяжелая фаза движется от оси гидроциклона к его стенкам по спиральной траектории вниз и через нижнюю насадку выбрасывается из гидроциклона. Более легкая фаза движется во внутреннем спиральном потоке, направленном вверх, и выбрасывается из

гидроциклона через патрубок для отвода верхнего продукта [42]. Вблизи оси гидроциклона центробежные силы настолько сильно возрастают, что появляется воздушный столб из-за разрыва жидкости.

Твердая частица, поступая в гидроциклон, вместе с потоком пульпы вовлекается во вращательное движение вокруг оси гидроциклона; одновременно частица двигается в осевом и радиальном направлениях со скоростью, зависящей от соотношения между действующими на нее силами. Чем тоньше частицы и чем меньше разница между их плотностью жидкой фазы пульпы (воды), тем ближе совпадают траектории их движения с линиями тока жидкости. Самые тонкие частицы движутся в гидроциклоне почти так же, как частицы жидкости, и распределяются между песками и сливом в том же соотношении, что и жидкость.

На частицу в гидроциклоне действуют:

1. центробежная сила;
2. сила тяжести;
3. силы динамического давления жидкости и трения на поверхности раздела частица-жидкость, зависящие от кинематической и турбулентной вязкости;
4. архимедова сила, зависящая от плотности суспензии;
5. подъемная сила, возникающая в турбулентном потоке;
6. силы, связанные с турбулентной вязкостью;
7. силы сопротивления, возникающие при ударе о другие частицы и о стенки гидроциклона.

Учесть в аналитических расчетах влияние совокупности всех этих сил, величина которых изменяется в зависимости от параметров работы гидроциклона и характеристики обрабатываемого материала, не представляется возможным [39]. Поэтому некоторыми силами пренебрегают, так как их воздействие очень мало. Самое большое влияние на частицу оказывают центробежная сила и сила радиального потока. От их соотношения зависит направление движения частицы. Если центробежная сила будет больше силы сопротивления среды, то частицы будут отброшены к стенке гидроциклона и вместе с внешним потоком переместятся вниз и выйдут через нижнее отводное отверстие. При преобладании действия радиального потока частицы попадут в зону внутреннего потока и удалятся через верхнее отводное отверстие [42].

В некоторых частных случаях следует учитывать влияние силы тяжести. Г. М. Косой [39] доказал аналитическим путем изменение показателей работы с изменением угла установки гидроциклона. Уменьшение давления суспензии на входе в аппарат увеличивает влияние силы тяжести.

Скорость разделения неоднородных систем в поле центробежных сил выше по сравнению со скоростью разделения этих систем в поле силы тяжести. Отношение центробежной силы к силе тяжести можно сделать сравнением ускорений, действующих на частицы примесей в центробежном и гравитационном полях, т.к. применительно к частице определенной массы силы пропорциональны ускорениям. В общем случае центробежная сила  $P_{ц}$  (Н) выражается равенством [9-11,13,40, 42]:

$$P_{ц} = \frac{mV_t^2}{r} = \frac{GV_t^2}{gr}, \quad (2.1)$$

где  $m$  – масса вращающейся частицы, кг;  $G$  – вес частицы, Н;  $V_t$  – окружная скорость вращения, м/с;  $r$  – радиус вращения, м.

Окружная скорость вращения равна:

$$V_t = \omega r = \frac{2\pi nr}{60}, \quad (2.2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения, рад/с;  $n$  – число оборотов в минуту.

Сопоставляя эти равенства, найдем:

$$P_{ц} = \frac{G}{gr} \left( \frac{2\pi nr}{60} \right)^2 \quad (2.3)$$

или приближенно:

$$P_{ц} \approx \frac{Grn^2}{900} \quad (2.4)$$

Отношение центробежного ускорения  $V_t^2/r$  к ускорению силы тяжести  $g$  называют фактором разделения:

$$K_p = \frac{V_t^2}{gr}. \quad (2.5)$$

Для величины  $G = 1$ Н получаем:

$$K_p = \frac{rn^2}{900}. \quad (2.6)$$

Фактор разделения является важной характеристикой гидроциклонов и центрифуг, т.к., при прочих равных условиях, разделяющее действие при осадительном центрифугировании возрастает пропорционально величине  $K_p$ .

Скорость  $V$  движения частицы в жидкости под действием центробежной силы зависит от ее диаметра  $d_{\text{ч}}$ , разности плотностей фаз  $\Delta\rho$ , вязкости  $\mu_c$  и плотности  $\rho_c$  суспензии и от ускорения центробежного поля  $J$ :

$$V = \frac{k^{0,385} d_{\text{ч}}^m \rho_c^{(m-2)/3} \Delta\rho^{(m+1)/3} J^{(m+1)/3}}{\mu_c^{(2m-1)/3}}. \quad (2.7)$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  и показатель степени  $m$  зависят от гидродинамического режима.

Для ламинарного режима при числе Рейнольдса  $Re_{\text{ч}} = w_{\text{ос}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} / \mu_0 = 1,6 : m = 2, k = 1,7 \cdot 10^{-4}$ .

Для переходного режима при  $Re_{\text{ч}} = 16 \div 420: m = 1,2, k = 2,49 \cdot 10^{-3}$ .

Для турбулентного режима  $Re_{\text{ч}} > 420: m = 5,36, k = 0,5$ .

Движению частиц в радиальном направлении будет оказывать препятствие сила сопротивления жидкости. Как известно, она определяется следующими выражениями:

для ламинарного режима (при  $Re = 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-1}$ ) по Стоксу:

$$R = 3\pi\mu du; \quad (2.8)$$

для турбулентного режима ( $Re = 10^3 \div 2 \cdot 10^5$ ) по закону Ньютона:

$$R = 3\pi\mu du; \quad (2.9)$$

в переходной области ( $Re = 22 \div 500$ ) с учетом уравнения Аллена  $\lambda = 18,5/Re^{0,6}$ :

$$R = 55 \cdot 10^{-3} \pi d^2 u^2 \rho_{\text{ж}}, \quad (2.10)$$

где  $d$  – диаметр частицы, м;  $u$  – скорость движения частицы по отношению к жидкости, м/с;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, кг/(м·с);  $\lambda$  – коэффициент сопротивления среды.

Для областей  $Re = 0,4 \div 2$  и  $Re = 5 \cdot 10^2 \div 10^3$  отсутствуют конкретные рекомендации по количественному определению коэффициента сопротивления и поэтому сила сопротивления приближенно оценивается выражением (2.8) для  $Re = 0,4 \div 2$  или выражением (2.9) для  $Re = 5 \cdot 10^2 \div 10^3$  [40].

Направление движения частицы в гидроциклоне определяется соотношением центробежной силы и силы сопротивления. Если центробежная сила преобладает над центробежной силой, то частицы будут отброшены к стенке гидроциклона и вместе с внешним потоком переместятся вниз и выйдут через нижнее сливное отверстие. В обратном случае частицы попадают в зону внутреннего потока и удаляются через верхнее сливное отверстие. Если же эти силы будут равны, то частицы будут продолжительное время циркулировать в гидроциклоне.

Для процесса разделения в гидроциклоне характерны большие скорости жидкости, которая подается в аппарат под давлением, что объясняет появление турбулентных пульсаций и вихрей. Течение жидкости носит турбулентный характер.

Небольшие частицы, вовлекаются с тем или иным отставанием по фазе и амплитуде в пульсационное движение среды и совершают вместе с ней интенсивное диффузионное перемещение по потоку. Более того, наличие весьма значительных градиентов осредненной скорости среды и ее пульсационных составляющих в пристеночной области потока вызывает появление еще двух специфических форм движения частиц. Одной из них является продольное скольжение частиц относительно среды со скоростью, соизмеримой со скоростью ее течения, другой — поперечная миграция частиц со скоростью, соизмеримой со скоростью турбулентных пульсаций среды.

По этим причинам распределение концентрации частиц по поперечному сечению турбулентного потока оказывается существенно отличным от распределения частиц в ламинарном потоке. Другим следствием турбулентности среды является резкое повышение интенсивности осаждения частиц из турбулентного потока на обтекаемых им стенках.

При турбулентном режиме течения жидкости скорость осаждения частиц на стенках труб и каналов обычно на несколько порядков превосходит скорость диффузионного (броуновского) осаждения тех же частиц из ламинарного потока и, в противоположность последнему, возрастает с повышением скорости течения среды, свидетельствуя, тем самым, об инерционной природе явления.

Минимальный диаметр  $d_{\text{ч}}$  улавливаемых частиц определяем по формуле (2.11) [4,7]:

$$d_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{K\mu_{\text{ж}}}{L \left( \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \right) \frac{\Delta p'}{Q}}} \quad (2.11)$$

где  $K$  – критерий эффективности гидроциклона;  $\mu_{ж}$  – вязкость жидкости, Па·с;  $L$  – рабочая длина гидроциклона, м;  $\rho_{ч}$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление гидроциклона, Н/м<sup>2</sup>;  $Q$  – производительность гидроциклона, м<sup>3</sup>/с.

## 2.2 Изменение плотности суспензии по объему гидроциклона

Во время работы гидроциклона на рудных пульпах или тяжелых суспензиях частицы твердой фазы под действием совокупных сил распределяются по объему аппарата в соответствии с их крупностью, плотностью, формой и концентрацией. При этом соблюдается следующая основная закономерность: плотность суспензии, крупность и плотность твердых частиц увеличивается в направлении от оси гидроциклона к его стенкам и от сливного патрубка к песковой насадке. Исключение из этого правила составляет лишь распределение зерен легкой фракции при обогащении в тяжелой суспензии. В этом случае в гидроциклоне, особенно вблизи песковой насадки, создается среда, плотность которой превышает плотность зерен легкой фракции, поэтому даже наиболее крупные зерна последней не могут проникнуть к стенкам аппарата в его нижней части и вытесняются через сливной патрубок [39].

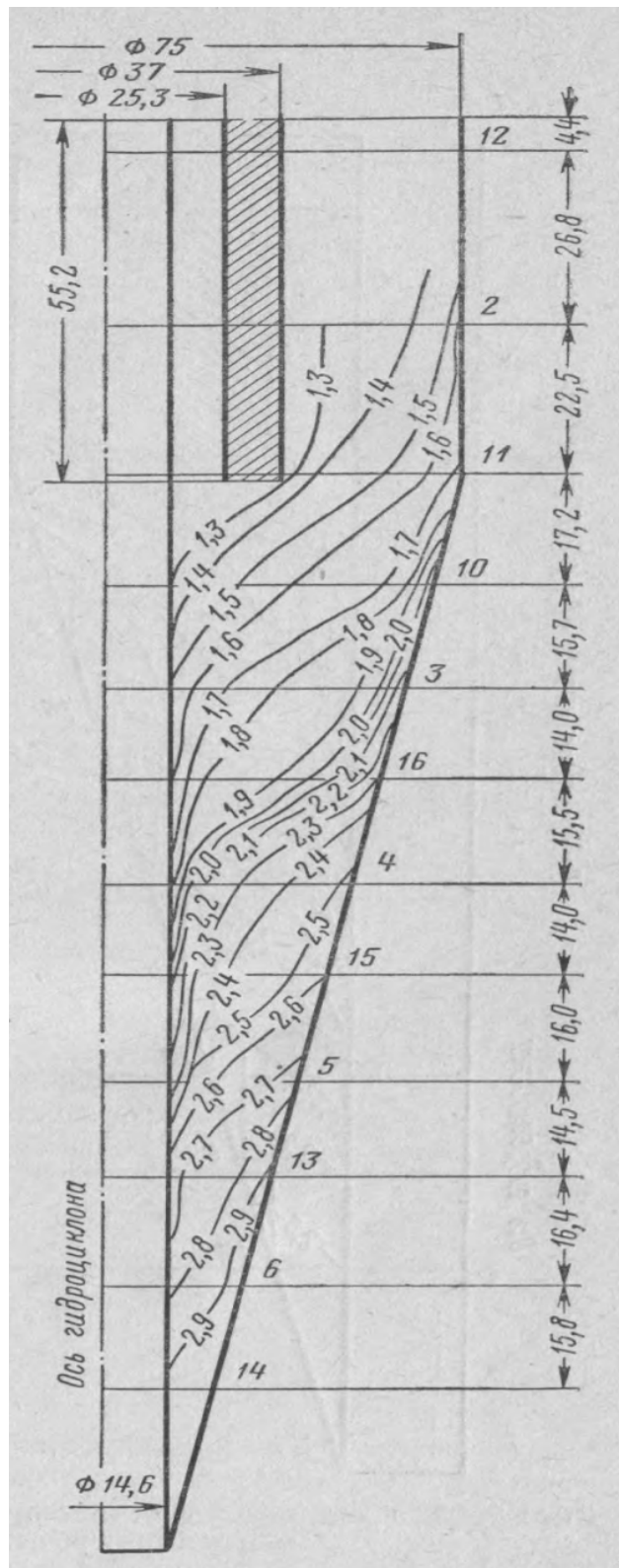


Рисунок 2.1 – Кривые постоянной плотности в гидроциклоне (давление на входе 2,7 кгс/см<sup>2</sup>)



В работе [39] на основе анализа других работ сказано, что в гидроциклоне образуются как бы поверхности постоянной плотности и постоянной крупности, имеющие форму конуса с углом конусности, большим, чем угол конусности самого гидроциклона (рисунок 2.1, рисунок 2.2). Однако плотность суспензии и крупность твердой фазы изменяются по высоте (рисунок 2.3), происходит их резкое изменение, определяющее границу раздела зон уплотненной суспензии вблизи песковой насадки не менее плотной суспензии в верхней части гидроциклона. Эта граница должна быть близка к поверхности раздела внешнего потока на поток, уходящий в песковое отверстие, и поток, переходящий во внутренний вихрь и выходящий в сливной патрубок.

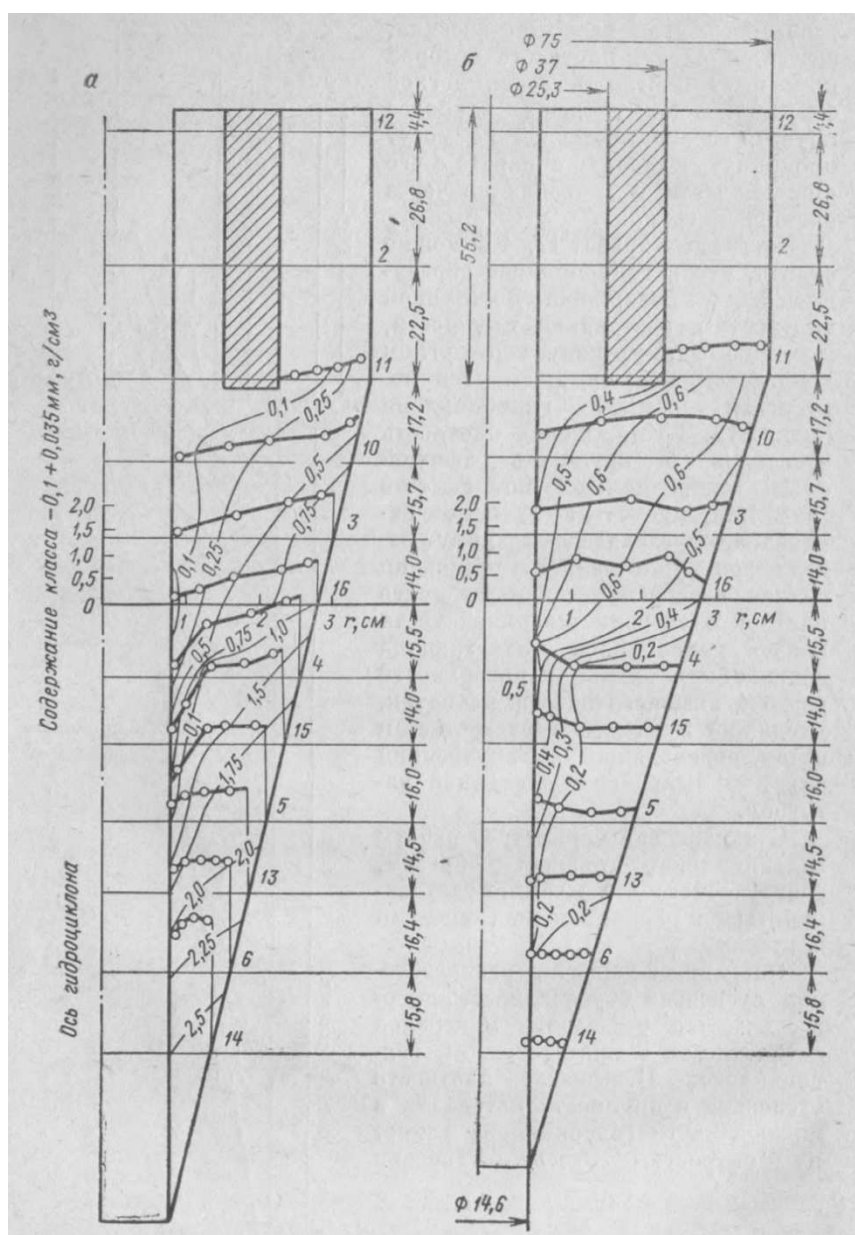


Рисунок 2.2 – Содержание классов 0,1-0,035 мм (а) и 0,035-0 мм (б) в единице объема суспензии (по Ангелову)

С изменением параметров работы гидроциклона, главным образом, разгрузочного отношения, будет изменяться и распределение суспензии в нем.

Описанный характер распределения суспензии обуславливает высокое качество разделения минералов по плотности в тяжелосреднем гидроциклоне. Повышение плотности суспензии и крупности материала в нижней части гидроциклона влияет на скорость. Здесь суспензия вращается почти как твердое тело – окружная скорость увеличивается пропорционально радиусу, причем абсолютная ее величина меньше, чем при работе гидроциклона на воде.

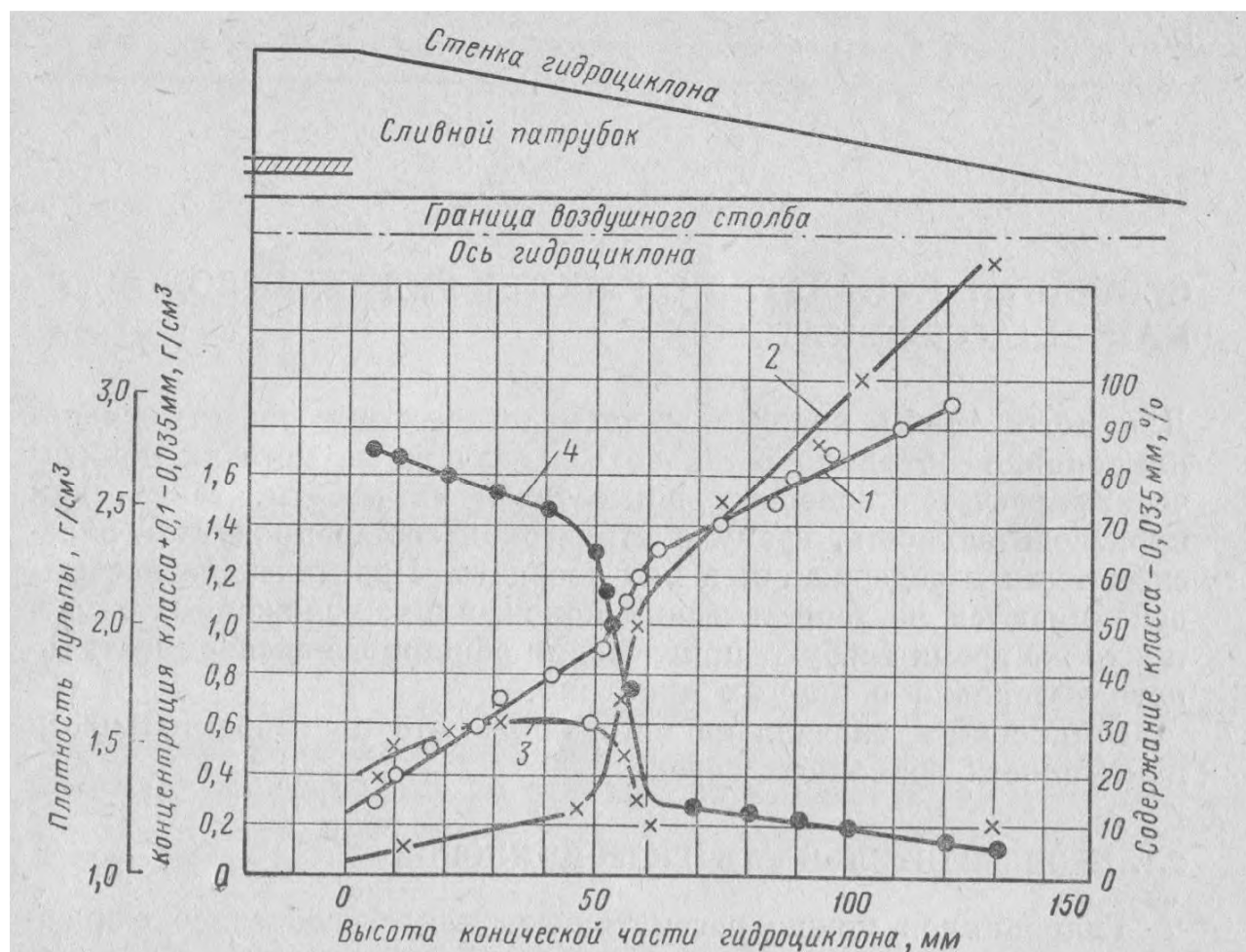


Рисунок 2.3 – Изменение плотности пульпы и крупности ее твердой фазы по высоте гидроциклона на радиусе сливного патрубка

1 – плотность пульпы; 2 – концентрация класса: от  $-0,1$  до  $+0,035$  мм; 3 – то же:  $0,035$  мм; 4 – содержание класса:  $0,035$  мм

Граничная плотность, по которой разделяется обогащаемый материал, всегда выше плотности суспензии, подаваемой в гидроциклон, и зависит как от характеристики утяжелителя, так и от параметров работы гидроциклона, главным образом, разгрузочного отношения.

### 2.3 Движение жидкости в гидроциклоне

В гидроциклоне в процессе его работы образуется три основные области, которые характеризуются разными структурами потока:

1. внутренняя область;
2. внешняя область;
3. пристенная область.

Внутренняя область представляет собой цилиндрический вихрь с воздушным столбом по оси [39]. Наличие воздушного столба зависит от режима работы циклона, а именно от давления на входе. При нормальном рабочем давлении можно увидеть воздушный столб, который будет иметь высоту, равную высоте гидроциклона от нижнего сливного отверстия до верхнего. Воздушный столб исчезнет или будет очень маленьким в высоту при понижении давления. Если же давление будет слишком высоким, то произойдет выливание жидкости через нижнее сливное отверстие, а воздушный столб будет увеличиваться по высоте. Так же на образование воздушного столба влияет состояние разгрузочных отверстий (открытые или закрытые).

Между внутренней и внешней областями образуется кольцевой вихрь [39], в котором жидкость движется одновременно в оба направления.

Наряду с основными нисходящими и восходящими потоками в гидроциклонах наблюдаются многочисленные местные циркуляции и турбулентное перемешивание. Все это определяет сложность гидродинамических процессов и оказывает влияние на разделение дисперсных систем в гидроциклонах[27].

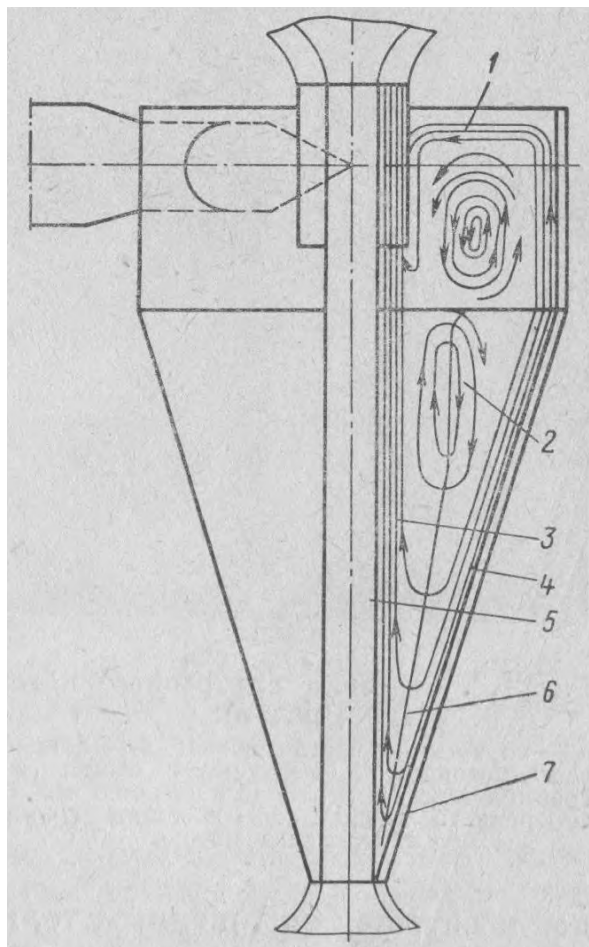


Рисунок 2.4 – Схема движения жидкости  
1 – подкрышечный поток; 2 – замкнутый кольцевой вихрь; 3 – внутренний поток; 4 – внешний поток; 5 – воздушный столб; 6 – поверхность нулевых осевых скоростей; 7 – часть внешнего потока, разгружающаяся через песковую насадку

В первый момент при подаче воды в пустой гидроциклон ее поток из питающей насадки, попадая на стенку гидроциклона, растекается по ней тонким слоем, расширяющимся по мере удаления от места подачи. Растекающаяся кверху часть потока встречает сопротивление крышки и набегает на нижнюю поверхность последней. Растекающаяся книзу часть потока идет по спирали вдоль стенок конуса к песковой насадке, через которую выходит только часть общего потока, поэтому гидроциклон быстро заполняется вращающейся жидкостью и вдоль его оси образуется вращающийся поток, направленный к сливному патрубку. Поступательное движение внешнего потока от места подачи к вершине конуса обуславливается также уменьшением радиуса вращения и трением о стенки, вызывающими понижение давления в нижней части конуса по сравнению с давлением в верхней части на том же радиусе. Вблизи оси гидроциклона центробежная сила становится настолько большой, что жидкость разрывается, образуется воздушное ядро (вихревой шнур), имеющее вид воздушного столба.

Таким образом, в гидроциклоне возникают два основных вращающихся в одну сторону потока – внешний, имеющий поступательное движение по спирали вниз, и внутренний, двигающийся по спирали вверх к сливному патрубку. Внешний поток, подходя к вершине конуса, делится на две части: нижнюю, которая, не меняя направления поступательного движения, уходит из гидроциклона через песковую насадку, и верхнюю, которая образует внутренний поток, изменяя направление поступательного движения. Между внешним и внутренним потоками на уровне несколько ниже конца сливного патрубка образуется замкнутый кольцевой вихрь, в котором жидкость одновременно с вращением вокруг оси гидроциклона передвигается с наружной стороны в направлении к песковой насадке, а с внутренней – в направлении к крышке. Кроме этих потоков имеется так называемый подкрышечный поток, образованный частью исходного питания, обтекающего крышку, который направляется затем вниз по стенкам сливного патрубка и уходит в слив вместе с внутренним потоком [39].

По данным всех экспериментов точно можно сделать вывод о том, что в гидроциклоне всегда образуются два основных потока, но экспериментальные данные о форме замкнутых кольцевых вихрей разнятся (рисунок 2.5).

Внешняя область занимает большую рабочую часть гидроциклона. Направление жидкости во внешней области направлено вниз к сливному отверстию по спирали. В этой области наблюдается турбулизация потока. При турбулентном режиме течения гидродинамические и термодинамические характеристики жидкости (скорость, температура, давление, массовая плотность, концентрации химических компонентов, показатель преломления среды и т.д.) испытывают хаотические пульсации и потому изменяются от

точки к точке и во времени нерегулярно. Благодаря образованию многочисленных вихрей различных размеров, турбулентные течения обладают повышенной способностью к переносу количества движения, энергии и массы элементарных жидких объемов, что приводит, как к увеличенному силовому воздействию на обтекаемые твердые тела, так и к интенсивным теплообмену и перемешиванию между слоями, к ускоренному протеканию химических реакций и т.п. [19]. Поэтому в гидроциклоне наблюдается турбулентная диффузия – явление локального переноса макромасс жидкости и перенос частиц дисперсной среды [1]. Данное явление оказывает существенное влияние на процесс разделения в гидроциклоне.

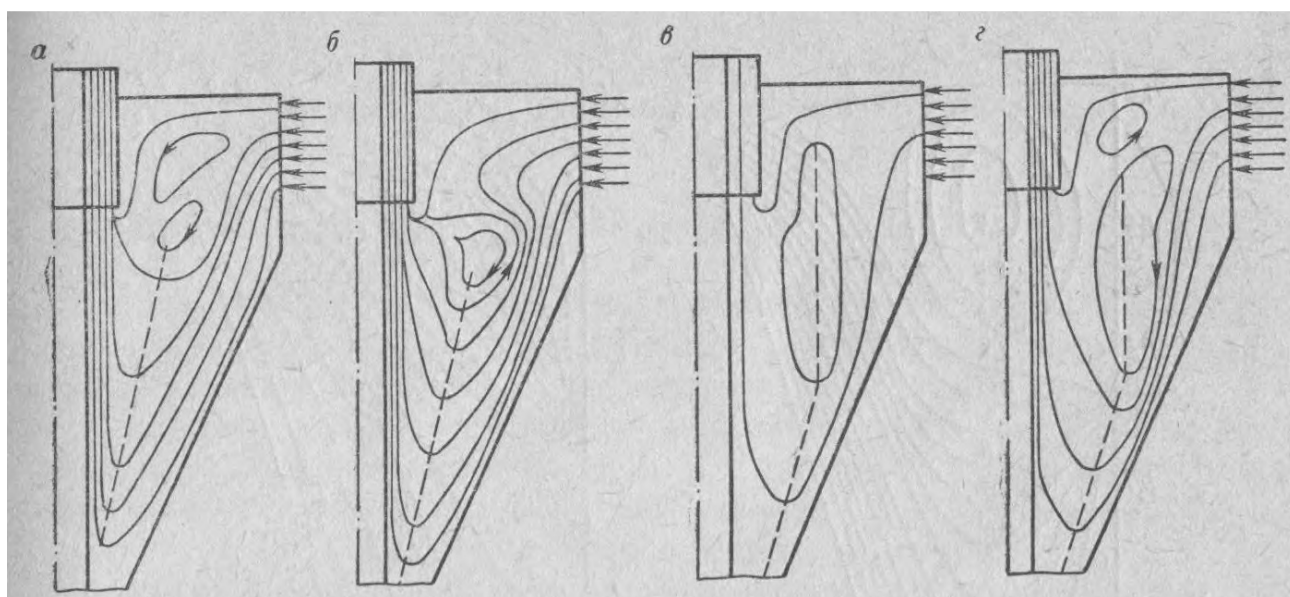


Рисунок 2.5 – Качественная картина распределения потоков в гидроциклоне:  
а – по Тартьяну; б – по Беднарскому; в – по Брэдли; г – по Поварову

Применительно к суспензиям разработана диффузионная модель гидроциклона, учитывающая диффузию зерен только в радиальном направлении. При этом коэффициент турбулентной диффузии предполагается определять по формуле [1]:

$$D_t = 0,0112 \cdot V_t \cdot r \quad (2.12)$$

где  $V_t$  – окружная скорость движения зерен, принимаемая равной скорости движения жидкости, м/с;  $r$  – радиус, м.

Коэффициент турбулентной диффузии принимается равным коэффициенту турбулентной вязкости [1].

В пристенной области происходит сильное падение скорости среды и частицы. В этой области находится вязкий подслой, толщина которого очень

мала, поэтому иногда им можно пренебречь. Дисперсные частицы либо оседают на стенке и продолжают движение вниз к сливному отверстию, либо ударяются о стенку гидроциклона и продолжают свое движение в зависимости от силы, под влиянием которой она оказалась (центробежная сила или сила радиального потока).

## 2.4 Эффективность турбулентной сепарации

Мелкие частицы осаждаются с помощью диффузионно-инерционного механизма, поэтому и рассчитывать их очистку надо с учетом турбулентного пульсационного движения частиц.

Ключ к пониманию механизма и расчёту скорости турбулентно-инерционного осаждения даёт явление поперечной миграции частиц к поверхности гидроциклона. Физическая основа появления миграции частиц в сторону стенки заключается в следующем: мелкая, легко увлекаемая средой частица, в ходе движения среды совершает идентичное движение практически с тем же ускорением, что и среда [24,33].

При расчете эффективности турбулентной сепарации можно использовать модель Прандтля, которая широко применяется для описания турбулентного пограничного слоя [23-26]. В этом случае пограничный слой подразделяется на две резко отличающиеся по структуре области: тонкую пристеночную область чисто вязкого движения – вязкий подслой и область с полностью турбулентным движением – турбулентное ядро потока.

В вязком подслое профиль скорости описывается линейной функцией, а в турбулентной – логарифмической функцией. В результате сопряжения этих функций следуют два важных параметра турбулентного пограничного слоя: константа Прандтля  $\chi = 0,4$ ; безразмерная толщина вязкого подслоя  $R_1 \approx 11,6$  [26].

Эффективность турбулентной сепарации частиц  $\eta$  рассчитывается на основе энергетической модели по выражению [15, 24, 33]:

$$\eta = 1 - \text{EXP}(-N), \quad (2.16)$$

$$N = \frac{\beta_D F}{Q}, \quad (2.17)$$

где  $N$  – число единиц переноса, отнесенных к концентрациям потока;  $F$  – поверхность стенок гидроциклона,  $\text{м}^2$ ;  $\beta_D$  – коэффициент переноса дисперсной фазы,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $Q$  – производительность гидроциклона,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Если же твердая фаза представлена различными по диаметру частицами, то эффективность рассчитывается по правилу аддитивности. Это следует из

того, что принцип действия любого аппарата основан на использовании одного или нескольких механизмов, взвешенных в потоке дисперсных частиц. Влияние каждого из механизмов на общую эффективность сепарации зависит от размеров и плотности частиц, физических свойств среды и условий протекания процесса, и общая эффективность вычисляется по выражению:

$$\eta_{\Sigma} = 1 - \prod_i (1 - \eta_i), \quad (2.18)$$

где  $\eta_i$  – эффективность сепарации за счет  $i$ -го механизма.

Оценка размеров улавливаемых частиц за счет турбулентного механизма производится по комплексу, который определяет спектр осаждаемых частиц, рассмотренный в работе [24, 25, 33]:

– I группа – частицы, полностью увлекаемые турбулентными пульсациями среды. Их диаметр должен удовлетворять условию:

$$d_{\text{ч}} < 0,134 \sqrt{R \mu_{\text{жс}} / \rho_{\text{ч}} u_*}; \quad (2.19)$$

– II группа – частицы, обладающие некоторой инерционностью по отношению к увлечению турбулентными пульсациями:

$$0,134 \sqrt{R \mu_{\text{жс}} / \rho_{\text{ч}} u_*} < d_{\text{ч}} < 13,4 \sqrt{R \mu_{\text{жс}} / \rho_{\text{ч}} u_*}; \quad (2.20)$$

– III группа – частицы, не увлекаемые турбулентными пульсациями среды, должна удовлетворять условию:

$$d_{\text{ч}} > 13,4 \sqrt{R \mu_{\text{жс}} / \rho_{\text{ч}} u_*}, \quad (2.21)$$

где  $R$  – радиус гидроциклона, м;  $\mu_{\text{жс}}$  – вязкость жидкости, Па·с;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $u_*$  – динамическая скорость трения, м/с.

Динамическая скорость связана со средней диссипацией энергии  $\bar{\varepsilon}$  следующей формулой [23]:

$$u_* = \left( \frac{11,6 \chi \bar{\varepsilon} \nu}{\rho_{\text{жс}}} \right)^{0,25}, \quad (2.22)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta p S u_{\text{вх}}}{V_{\text{ж}}}, \quad (2.23)$$

где  $\chi = 0,4$  – константа Прандтля;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_{\text{жс}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta p$  – гидравлическое сопротивление

гидроциклона, Н/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь входного патрубка, м<sup>2</sup>;  $u_{\text{вх}}$  – скорость потока во входном патрубке, м/с;  $V_{\text{жс}}$  – объем жидкости в гидроциклоне, м<sup>3</sup>.

Известно, что перенос вещества может происходить как молекулярным путем, так и вследствие турбулентного обмена. Переносом с помощью молекулярного механизма можно пренебречь. Для доказательства последнего утверждения сделана оценка коэффициента броуновской диффузии с использованием данных для гидроциклона с диаметром 0,036 м (см. глава 4).

Коэффициент броуновской диффузии по формуле Стокса-Эйнштейна:

$$D_{\text{бр}} = \frac{k_6 T}{6\pi\mu r} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{6 \cdot 3,14 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} \cdot 2,98 \cdot 10^{-6}} = 0,463 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с},$$

где  $k_6$  – константа Больцмана, Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, К;  $r = d_{\text{ч}}/2 = 2,98 \cdot 10^{-6}$  м – радиус частицы, м.

Число Шмидта:

$$Sc_{\text{бр}} = \frac{\nu}{D_{\text{бр}}} = \frac{18,1 \cdot 10^{-6}}{0,463 \cdot 10^{-14}} = 39,1 \cdot 10^8.$$

Толщина слоя, в котором происходит молекулярный перенос:

$$\delta_{D_{\text{бр}}} = \frac{\delta_1}{Sc_{\text{бр}}^{2/3}} = \frac{11,6\nu}{u_* Sc_{\text{бр}}^{2/3}} = \frac{11,6 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}}{0,569 \cdot (39,1 \cdot 10^8)^{2/3}} = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Диаметр минимальных улавливаемых частиц в гидроциклоне диаметром 0,036 м составляет  $5,95 \cdot 10^{-6}$  м. Таким образом, диаметр минимальной частицы многократно превышает слой, в котором происходит молекулярный перенос.

Коэффициент переноса импульса [26]:

$$\frac{1}{\gamma} = \int_0^{\delta_1} \frac{dy}{\nu} + \int_{\delta_1}^{y_\infty} \frac{dy}{\nu_T}, \quad (2.25)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $\nu_T$  – коэффициент турбулентной вязкости, равный коэффициенту турбулентной диффузии (2.12) [1].

После интегрирования:

$$\gamma = \left( \frac{R_1}{u_*} + \frac{\ln(R_r/R_1)}{0,0112\bar{V}_t} \right)^{-1} = \frac{0,0112V_t u_*}{R_1 0,0112\bar{V}_t + u_* \ln(R_\infty/R_1)}, \quad (2.26)$$

где  $R_\infty = u_* R / \nu$  – безразмерная координата, так как при расчете учитывается турбулентный перенос по всему радиусу гидроциклона  $R$ .

Использование коэффициента переноса дисперсной фазы  $\beta_D$  позволяет выполнять расчет эффективности гидроциклона с минимальным привлечением экспериментальных данных. Данный коэффициент в общем случае [25]:



$$\beta_D = \frac{\gamma}{(1 + \omega_E \tau_P)}, \quad (2.28)$$

$\omega_E$  – угловая частота энергоёмких пульсаций:  $\omega_E = u_*/0,1R$ ;  $\tau_P$  – время релаксации частицы:  $\tau_P = \rho_{\text{ч}} d_{\text{ч}}^2 / 18\mu_{\text{ж}}$ . Произведение  $\omega_E \tau_P$  для частиц первой группы очень мало и не учитывается, так как в этом случае  $\omega_E \tau_P \ll 1$  [32].

Коэффициент переноса дисперсной фазы для частиц I группы:

$$\beta_D = \frac{0,0112V_t u_*}{R_1 0,0112\bar{V}_t + u_* \ln(R_{\infty}/R_1)}. \quad (2.29)$$

Коэффициент переноса дисперсной фазы для частиц II группы:

$$\beta_D = \frac{0,0112V_t u_*}{(R_1 0,0112\bar{V}_t + u_* \ln(R_{\infty}/R_1))(1 + \omega_E \tau_P)}. \quad (2.30)$$

Частицы III группы не увлекаются турбулентными пульсациями среды, и эффективность их удаления вычисляется по другим выражениям [38, 41].

Тангенциальная скорость  $\bar{V}_t$  определяется по экспериментальным данным. Если такие экспериментальные данные отсутствуют, то [23]:

$$\bar{U}_{\infty} = \bar{V}_t = 6,23u_*^{1,11} \left(\frac{R}{\nu}\right)^{0,111}. \quad (2.31)$$

### Контрольные вопросы:

1. В каких аппаратах происходит разделение под действием центробежной силы?
2. Чем отличаются друг от друга гидроциклоны-классификаторы, гидроциклоны-сгустители и гидроциклоны-сепараторы?
3. Какие силы действуют на твердую частицу в гидроциклоне? Какие силы учитываются при расчете, а какими – пренебрегают?
4. Назовите три основные области, образующиеся при работе в гидроциклоне. В чем их особенности?
5. От чего зависит наличие воздушного столба?
6. Как разделяются частицы в зависимости от устойчивости к турбулентным пульсациям среды?
7. Почему при расчете эффективности турбулентной сепарации вязким подслоем на стенке можно пренебречь?

## ГЛАВА 3

### КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Конструкции всех видов гидроциклонов очень просты относительно других аппаратов промышленности, хотя имеют некоторые особенности. От этих различий в конструкции гидроциклона зависят его рабочие характеристики, конструктивные размеры и режимы работы.

Аппараты, в которых происходят процессы разделения гетерогенных систем, различают по типам действующих сил, под действием которых происходит разделение. Поэтому выделяют целый класс аппаратов, разделение в которых происходит под действием центробежной силы: центрифуги, сепараторы, циклоны. В данном разделе будет рассмотрено конструктивное отличие гидроциклонов от других аппаратов.

Несмотря на то, что конструкция гидроциклона относительно очень проста, она имеет ряд конструктивных особенностей, которые отличают один тип гидроциклонов от другого типа. В соответствии с этими особенностями приведена классификация гидроциклонов по конструктивным особенностям.

#### 3.1 Общий вид гидроциклона

Гидроциклон имеет неподвижный корпус, состоящий из верхней цилиндрической и нижней конической частей (рисунок 3.1). Разделяемая суспензия подается насосом (или самотеком за счет напора столба суспензии) под избыточным давлением 0,3-2 ат через боковой патрубок в цилиндрическую часть корпуса. Суспензия поступает в корпус по касательной и потому начинает в нем вращаться. При вращении потока с большой угловой скоростью более крупные твердые частицы под действием центробежных сил инерции отбрасываются к стенкам гидроциклона. Возле стенок они движутся по спиральной траектории вниз и в виде сгущенной суспензии (песка) удаляются через песковую насадку 4. Более мелкие частицы и большая часть жидкости движутся во внутреннем спиральном потоке вокруг центрального патрубка 2 и в виде тонкой взвеси (слив) поднимаются по этому патрубку в камеру 3, откуда удаляются через верхний боковой патрубок. При большой скорости вращения потока вдоль оси гидроциклона образуется воздушный столб, давление в котором ниже атмосферного. Это воздушное ядро ограничивает с внутренней стороны поток мелких частиц в гидроциклоне.

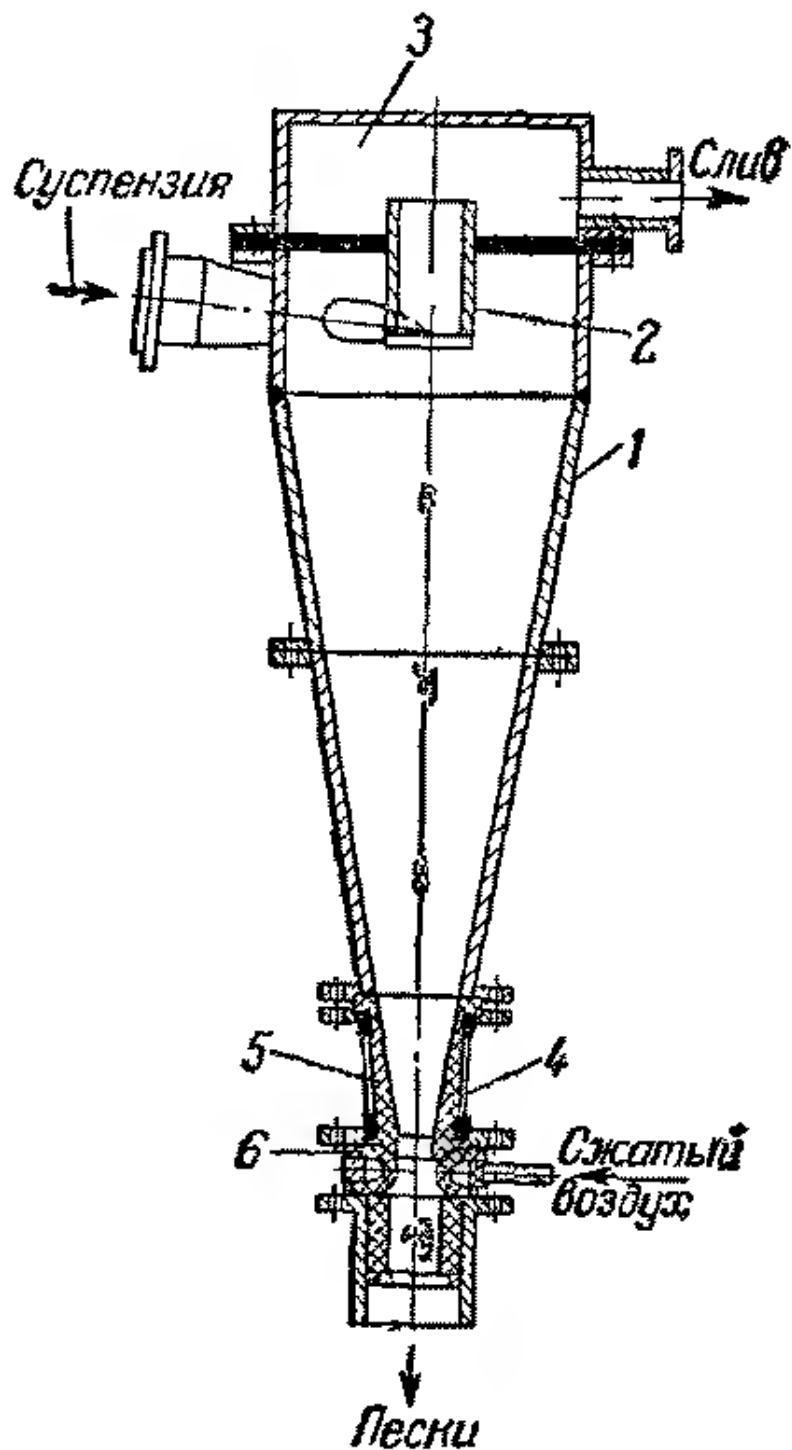


Рисунок 3.1 – Гидроциклон

1 – корпус; 2 – центральный (шламовый) патрубок; 3 – камера для слива; 4 – песковая насадка; 5 – резиновый вкладыш; 6 – резиновый манжет.

Разделяющее действие гидроциклона можно регулировать, изменяя глубину погружения шламового патрубка 2 и сечения песковой насадки 4. Насадки обычно являются сменными деталями различного сечения или же предусматриваются возможность регулирования сечения насадок. При нагнетании воздуха или масла в кольцевую полость резинового манжета 6

сечение насадки для прохода песков уменьшается. Таким образом, возможно автоматическое регулирование работы гидроциклона [37].

Корпус гидроциклона изготавливается чаще литым, иногда сварным или вытачивается из металла. Корпуса небольших гидроциклонов (диаметром 300-350 мм) отливают целиком, а корпуса гидроциклонов больших размеров – из отдельных секций, фланцы которых соединяют болтами. Преимуществами литых гидроциклонов перед сварными являются возможность изготовления литья из износостойчивых материалов, простота изготовления и более долгий срок службы (особенно при отливке их из легированного никелем чугуна) [42].

Для уменьшения износа корпус гидроциклона футеруют изнутри марганцовистым чугуном или плитками из каменного литья. В гидроциклонах для разделения малоабразивных тонких суспензий корпус изготавливают из чугуна. Применяют также гуммирование корпуса и быстроизнашивающихся деталей, т. е. покрытие их слоем износостойчивой резины; в песковых насадках часто устанавливают резиновый вкладыш 5 [37].

Достоинства гидроциклонов: высокая производительность, отсутствие в них движущихся частей, компактность, простота и легкость обслуживания, относительно небольшая стоимость, а так же широкая область применения. Кроме того, в гидроциклонах может быть достигнута более тонкая сепарация с большей плотностью слива и без укрупнения мелких частиц [18, 21].

### **3.2 Конструктивное отличие гидроциклонов от циклонов, центрифуг и сепараторов**

В центрифугах, сепараторах и циклонах происходит разделение гетерогенных систем под действием центробежных сил, но все они существенно различаются по конструкциям.

Процесс центрифугирования совершается за счет действия центробежной силы, развивающейся при вращении цилиндрического барабана, так называемой корзины центрифуги, в которую загружается фильтруемая масса.

Величина центробежной силы зависит от окружной скорости барабана и веса загрузки. Стенки барабана снабжены небольшими отверстиями. Обычно внутрь барабана вкладывается мешок из фильтровальной ткани. При вращении твердые частицы, входящие в состав смеси, остаются в барабане центрифуги. Частицы же жидкости вследствие своей удобноподвижности проходят через фильтровальный мешок и выбрасываются из барабана через отверстия в его боковой поверхности [6].

В сепараторах происходит разделение эмульсий и тонкодисперсных суспензий. Барабаны сепараторов не имеют боковых отверстий. Из-за большого числа оборотов центробежная сила влияет на расположение жидкостей эмульсии

или фаз тонкодисперсной суспензии. В первом случае, к стенкам барабана прилегает жидкость с большей плотностью, а жидкость с меньшей – образует внутренний слой. Во втором случае, у стенок барабана будут находиться частицы суспензии.

Центрифуги наибольшее применение получили при сгущении суспензий высокой концентрации, и в технологии очистки сточных вод их целесообразно применять для обезвоживания осадков [42]. Сепараторы применяются для разделения эмульсий.

Циклоны служат для очистки газов от дисперсных частиц, а гидроциклоны для разделения эмульсий и суспензий.

Таким образом, гидроциклоны отличаются от центрифуг и сепараторов тем, что у них нет движущихся частей, и отличаются от циклонов видом разделяемой смеси.

### **3.3 Классификация гидроциклонов по конструктивным особенностям**

По конструктивным особенностям все гидроциклоны можно разделить на следующие группы:

1. Конические гидроциклоны, получившие наибольшее распространение в промышленности и отличающиеся: числом выдаваемых продуктов (два или три); способом установки (вертикальные, горизонтальные и наклонные); конструкцией верхней разгрузочной части, когда верхний продукт отводится из цилиндрической части гидроциклона непосредственно через отводной патрубков или через промежуточную сливную камеру; способом установки и конструкцией питающего патрубка; конусностью ( $\beta=5\div 90^\circ$ ); относительной высотой цилиндрической части ( $0,2\div 0,4$  диаметра гидроциклона); конструкцией нижних насадок; материалами, из которых изготавливается гидроциклон, или футеровкой внутренней поверхности; способом регулировки работы гидроциклона (ручной или автоматический); способом отвода верхнего и нижнего продуктов (под уровень отводимых продуктов или свободный).

2. Батарейные гидроциклоны и мультигидроциклоны, отличающиеся числом элементарных циклонов в батарее, конструкцией, размером и компоновкой, способами питания и отвода продуктов.

3. Трехпродуктовые гидроциклоны, отличающиеся от конических тем, что они имеют две промежуточные камеры и два отводных патрубка для отвода верхнего продукта.

4. Цилиндрические гидроциклоны состоят из двух гидроциклонов: основного – цилиндрического и перечистного – конического.

5. Винтовые гидроциклоны, отличающиеся конструкцией направляющего устройства.

6. Турбогидроциклоны (центриклоны), отличающиеся от обычных гидроциклонов наличием турбинки, установленной внутри аппарата, а так же конструкцией турбинки и способом отвода продуктов [42].

### 3.3.1 Конические гидроциклоны

Конические гидроциклоны бывают [8]:

1. безнапорные (открытые), используются для выделения оседающих и грубодисперсных всплывающих примесей.

Открытые гидроциклоны (Рисунок 3.2, а) бывают без внутренних устройств, с диафрагмой и цилиндрической перегородкой (Рисунок 3.2, б) и многоярусные (Рисунок 3.3).

У гидроциклонов с открытым верхом входной патрубков либо присоединен к конической части, либо отсутствует. В этом случае верхний продукт удаляется через сливной порог. Гидроциклоны с открытым верхом работают при очень низких давлениях и применяются для разделения мелкозернистого материала при классификации по крупности [41].

При очистке нефтесодержащих сточных вод рекомендуется применять открытые гидроциклоны. Эффект очистки от нефтепродуктов достигается тем, что в вихревом движении воды создается увеличивающаяся к центру угловая скорость, способствующая концентрированию нефтяных частиц в центральной части аппарата. Осветленная вода отводится тонким слоем через водослив, отдаленный от всплывшего слоя полупогружной перегородкой. Уловленные нефтепродукты с поверхности воды могут быть удалены через переливные воронки или лотки. Образующийся в конусной части гидроциклона осадок выпускается через патрубок со шламовой насадкой.

В простом по конструкции открытом гидроциклоне уходящим потоком жидкости могут захватываться взвешенные вещества из периферийной зоны [17], и это снижает эффективность гидроциклона при увеличении гидравлической нагрузки. Преодолеть этот недостаток позволяет установка конической диафрагмы и внутренней цилиндрической стенки. Существенно увеличивает производительность гидроциклона и качество очистки жидкости перевод его на режим работы гидроциклона-флотатора. Последний отличается от обычного открытого гидроциклона тем, что 20—30 % очищаемой воды подвергается насыщению воздухом при избыточном давлении в напорном резервуаре. При этом эффект очистки по взвешенным веществам 45—60 %, по нефтепродуктам 60—95 %.

Многоярусные гидроциклоны применяют для выделения тяжелых, неслеживающихся, грубодисперсных примесей и нефтепродуктов [32].

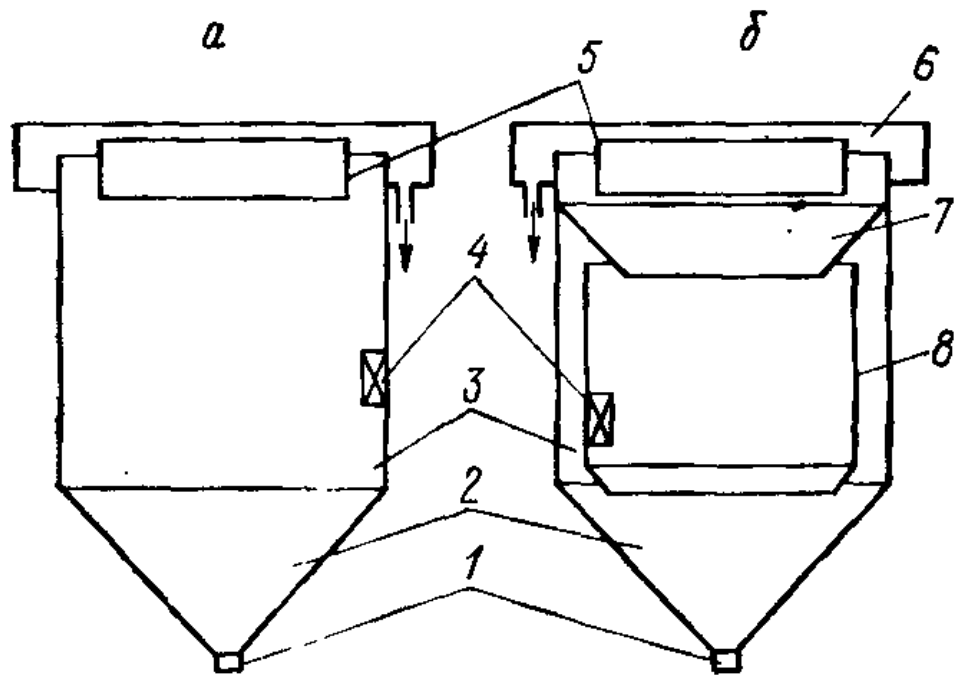


Рисунок 3.2 – Устройство открытых гидроциклонов  
 а – простой конструкции; б – с диафрагмой и цилиндрической перегородкой; 1 – шламобуфер; 2 – коническая часть; 3 – цилиндрическая часть; 4 – входное отверстие; 5 – полупогружная кольцевая перегородка; 6 – отводящий лоток; 7 – коническая диафрагма; 8 – цилиндрическая перегородка.

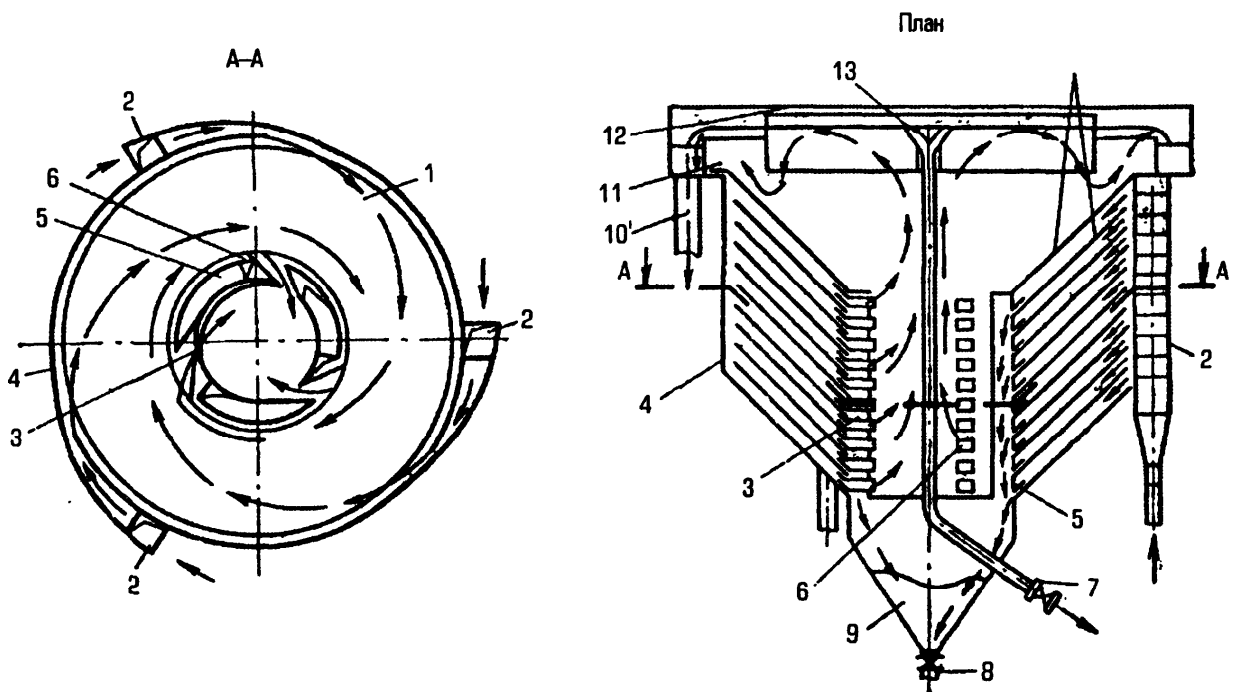


Рисунок 3.3 – Многоярусный открытый низконапорный гидроциклон  
 1 – конические диафрагмы; 2 – впускные камеры; 3 – насадки для отвода жидкости; 4 – корпус; 5 – шламприемные щели; 6 – окна для отвода дисперсной среды; 7 – трубопровод для отвода дисперсной среды; 8 –

трубопровод для отвода шлама; 9 – бункер для шлама; 10 – выпуск очищенной жидкости; 11 – жидкостносливная стенка; 12 – щит, удерживающий дисперсную среду; 13 – воронка для приема дисперсной среды.

2. напорные гидроциклоны используются для сгущения шламов, образующихся на сооружениях механической очистки сточных вод (рисунок 3.4)

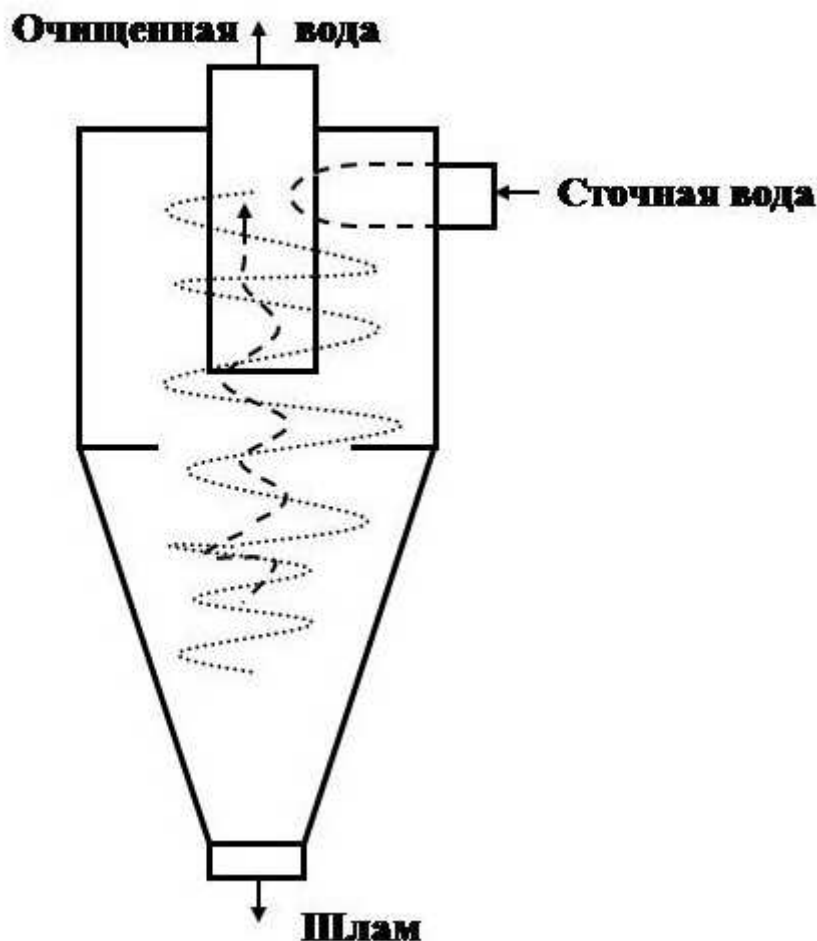


Рисунок 3.4 – Напорный гидроциклон для очистки сточных вод

Преимущества напорных гидроциклонов:

1. компактность в сочетании с высокой удельной производительностью;
2. высокая эффективность и надежность в разнообразных эксплуатационных условиях (взрыво-пожароопасные, агрессивные, абразивные среды);
3. широкий интервал рабочих температур и давлений;
4. простота конструкций, удобство эксплуатации.



### 3.3.2 Батарейные гидроциклоны и мультигидроциклоны

Чем меньше диаметр гидроциклона, тем больше развиваемые в нем центробежные силы и, следовательно, тем меньше размер отделяемых частиц. Применяемые в качестве классификаторов гидроциклоны имеют диаметр 300-350 мм и высоту 1-1,2 м. Для сгущения суспензий используются успешно гидроциклоны диаметром 100 мм и менее. Для сгущения и осветления тонких суспензий применяют гидроциклоны диаметром 10-15 мм [18].

Хорошее разделение суспензий, особенно в процессе сгущения и осветления, достигается в случае, когда гидроциклоны имеют удлиненную форму с углом конусности  $15^\circ$  и даже  $10^\circ$ . При такой форме корпуса удлиняется путь твердых частиц, увеличивается время пребывания их в аппарате и, таким образом, повышается эффективность разделения [18].

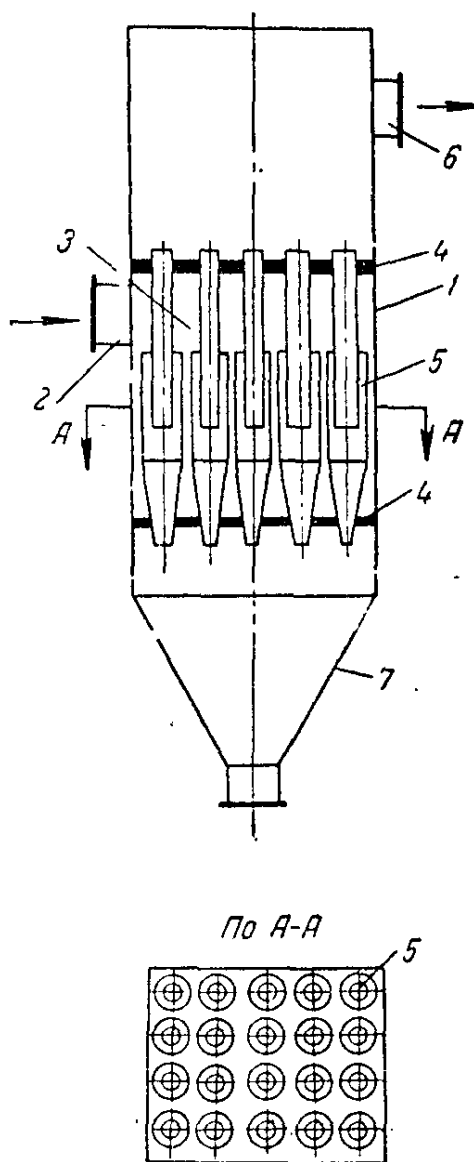


Рисунок 3.5 – Батарейный гидроциклон

1 – корпус гидроциклона; 2 – входной патрубок; 3 – распределительная камера; 4 – трубные решетки; 5 – мультигидроциклоны; 6 – выходной патрубок; 7 – коническое днище.

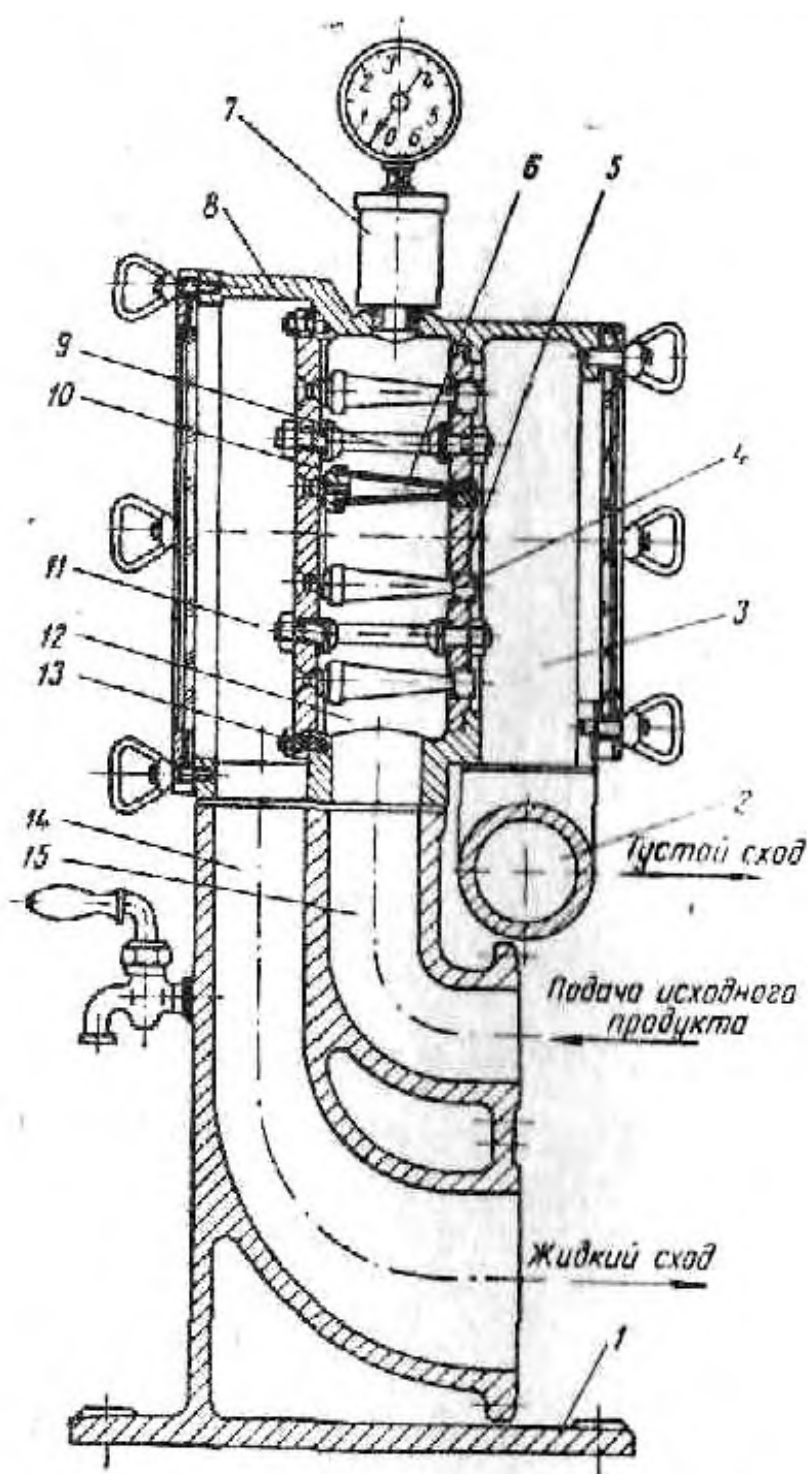


Рисунок 3.6 – Вертикальный разрез мультициклона ГБ-2 [22]

1 – основа корпуса; 2 – патрубок нижнего слива; 3 – камера для сбора нижнего слива; 4 – нижняя насадка; 5 – диски; 6 – гидроциклоны; 7 – защитный сосуд; 8 – корпус; 9 – стойка; 10 – диски; 11 – камера верхнего схода; 12 – средняя камера; 13 – гайка; 14 – патрубок верхнего схода; 15 – патрубок.

Иногда устанавливается несколько гидроциклонов, образующих одну батарею, которая питается от общей подводной трубы. Такой аппарат называется батарейным гидроциклоном (Рисунок 3.5). Если соединение осуществляется в одном корпусе, такой аппарат называется мультициклоном (Рисунок 3.6). Отдельные гидроциклоны, составляющие мультициклон, называются микроциклонами.

Батарейные гидроциклоны и мультициклоны отличаются числом микроциклонов, размером, способами соединения, питанием и отводом продуктов [42].

Производительность и батарейного гидроциклона, и мультигидроциклона вычисляется одинаково. В обоих случаях производительность комплекса равна произведению количества микроциклонов и производительности каждого отдельного микроциклона.

### 3.3.3 Трехпродуктовые гидроциклоны

Трехпродуктовый конический гидроциклон (Рисунок 3.7) представляет собой аппарат с двумя промежуточными камерами и двумя отводными патрубками для отвода верхнего продукта. Из гидроциклона промежуточный продукт выходит через кольцевое пространство между отводными патрубками, а остальное количество потока – через внутренний патрубок. Более тяжелая фаза (нижний продукт) разгружается через нижнюю насадку.

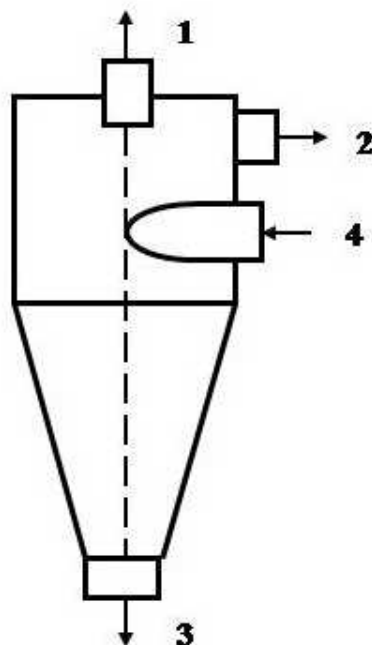


Рисунок 3.7 – Трехпродуктовый гидроциклон для очистки сточных вод от нефтепродуктов

1 – нефть; 2 – осветленная вода; 3 – осадок; 4 – нефтесодержащая вода.

В трехпродуктовом гидроциклоне вследствие вращательного движения жидкости в наружном отводном патрубке более тяжелая фаза под действием центробежной силы сконцентрируется у внутренней его стенки, а более легкая – ближе к осевой части. При этом через внутреннюю трубку выносятся наиболее легкие частицы, чем через кольцевое пространство.

На практике трехпродуктовые гидроциклоны применяются не столько для разделения исходного материала на три продукта, сколько для дополнительной регулировки точности разделения обрабатываемого материала на два продукта.

Трехпродуктовый гидроциклон позволяет регулировать качество двух конечных продуктов разделения путем изменения выхода промежуточного продукта, который в виде циркулирующей нагрузки может быть возвращен в гидроциклон [42].

### **3.3.4. Цилиндрические гидроциклоны**

Цилиндрические гидроциклоны применяются для обогащения крупнозернистых смесей при первичной стадии обогащения. Гидроциклоны данного типа изготавливаются одно- и многоступенчатые.

Цилиндрический двухступенчатый гидроциклон (Рисунок 3.8) состоит из двух циклонов: основного – цилиндрического 3 и перечистного – конического 6. Исходный продукт, входящий через питающий патрубок 1, разделяется в цилиндрическом гидроциклоне на два продукта: верхний, удаляющийся через патрубок 2 и нижний, переходящий по каналу 4 в конический гидроциклон. Наиболее тяжелая фракция покидает аппарат через регулируемую насадку 7, а через патрубок 5 выходит промежуточный продукт, который снова может быть направлен на рециркуляцию в цилиндрический гидроциклон 3.

Данные аппараты также обладают высокой производительностью и успешно зарекомендовали себя в таких применениях, как переработка техногенных месторождений, выделение породы из угольной мелочи, обогащение тонкоизмельченных золото- и оловосодержащих руд, промывка песка.

Цилиндрические гидроциклоны способны классифицировать материалы по плотности при относительно низкой эффективности классификации по крупности материала.

Использование цилиндрических гидроциклонов является целесообразным с точки зрения экономии эксплуатационных затрат. Так как данный тип гидроциклонов не является высоконапорным и не требует специального обслуживания. Цилиндрические гидроциклоны обладают высокими

показателями по износостойкости по сравнению с оборудованием аналогичного применения, имеют небольшие габаритные размеры.

Технологические показатели цилиндрических гидроциклонов приблизительно такие же, как и у конических [42].

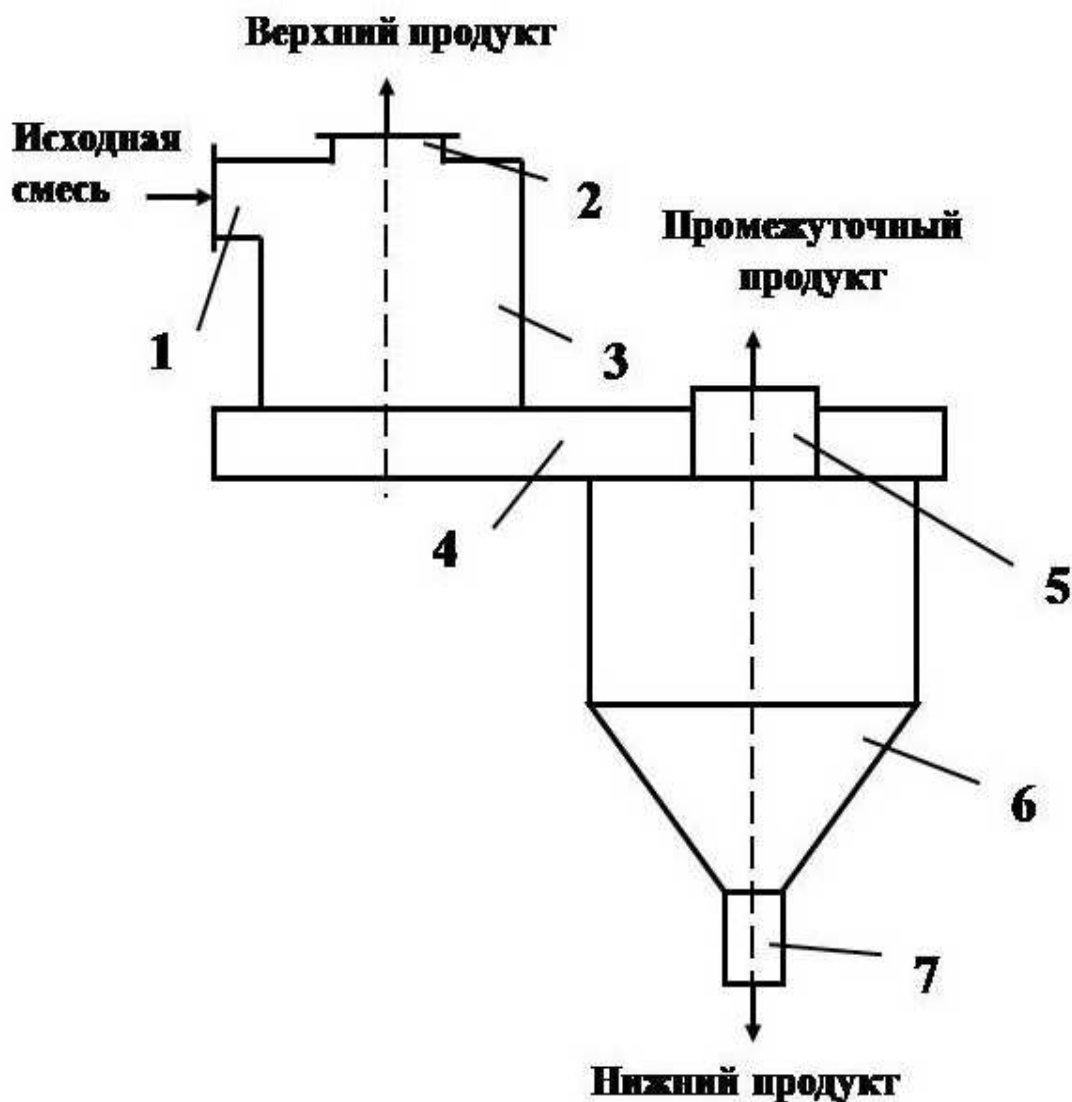


Рисунок 3.8 – Цилиндрический гидроциклон

1 – питающий патрубок; 2 – удаляющий патрубок; 3 – цилиндрический циклон; 4 – канал; 5 – промежуточный удаляющий патрубок; 6 – конический циклон; 7 – регулируемая насадка.

### 3.3.5. Винтовые гидроциклоны

В винтовом гидроциклоне (Рисунок 3.9) основной поток движется по спирали. При этом более тяжелая фаза из внешнего слоя потока отводится наружу, а более легкая фаза разгружается через насадку.

К винтовым гидроциклонам относятся также гидроциклон с неподвижным направляющим колесом. В этом гидроциклоне центробежная сила возникает при движении жидкости через лопатки колеса. В отличие от обычных гидроциклонов здесь жидкость вводится сверху по оси аппарата. Более легкая фаза отводится через трубу, расположенную по оси аппарата, а более тяжелая фаза – через нижний тангенциально расположенный патрубок [42].

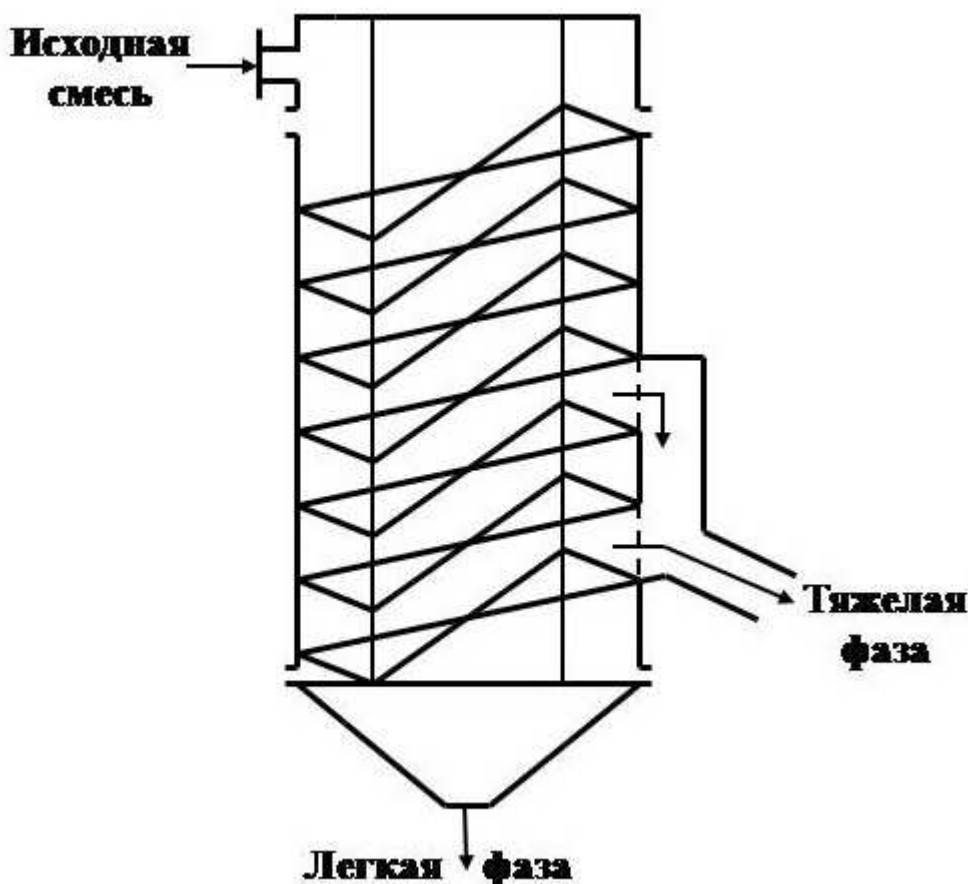


Рисунок 3.9 – Винтовые гидроциклоны

### 3.3.6 Турбогидроциклоны

По принципу действия турбоциклон является комбинацией гидроциклона и центрифуги. Необходимый для работы напор создается не насосом, как в гидроциклонах, а турбинкой, расположенной в цилиндрической части аппарата (Рисунок 3.10, а). Турбоциклоны отличаются конструкцией турбинки, способом питания и отбором продуктов разделения (Рисунок 3.10, б, в, г).

Нижний продукт удаляется через нижнее отводное отверстие, а верхний продукт – через центральную трубу, проходящую вдоль оси аппарата. Диаметр нижнего отводного отверстия можно регулировать сжатым воздухом с помощью резинового кольца.

При конструировании турбоциклонов предполагалось, что замена насоса турбинкой снизит удельный расход электроэнергии, однако это предположение не оправдалось.

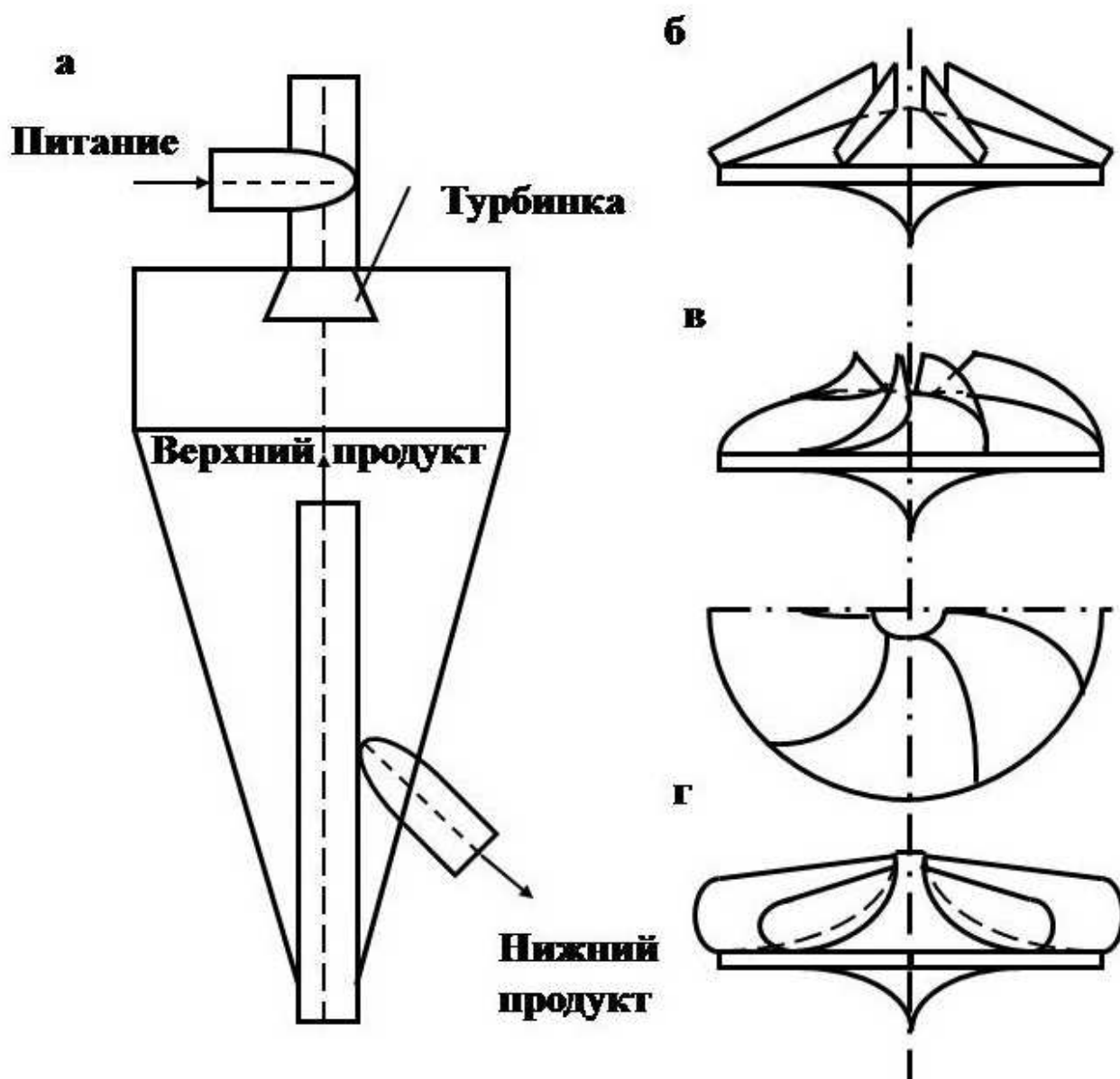


Рисунок 3.10 – Турбогидроциклоны

Турбоциклоны не обладают технологическими преимуществами перед коническими гидроциклонами, но более сложны по конструкции (ввиду наличия вращающейся с большой скоростью турбинки и трудности уплотнения вала) и поэтому имеют ограниченное применение в промышленности [42].

### 3.4 Маркировка и технические характеристики гидроциклона

Рекомендуются пятизначные обозначения единичных гидроциклонов и семизначные батарейных гидроциклонов. Первые две буквы – тип гидроциклона (таблица 3.1), третья буква – конструкционный материал (таблица 3. 2); цифры – основные геометрические характеристики аппаратов и номер модели, отражающий специфические конструктивные особенности гидроциклонов. Например, условное обозначение ТВК-40-5-01 означает: единичный аппарат с тангенциальным вводом суспензии (ТВ), выполненный из коррозионно-стойкой стали (К) с внутренним диаметром цилиндрической части, равным 40 мм, и углом конусности 5°, модель 01. В маркировке батареи гидроциклонов 30-02-ТВК-40-5-01 первая цифра – число элементов в батарее, вторая – модель установки, остальное – характеристика единичного элемента.

Таблица 3.1 – Условное обозначение типа гидроциклонов

Условное обозначение	Тип цилиндрикоконического гидроциклона
1	2
ТВ	С тангенциальным вводом
ПН	Прямоточные с направляющим элементом
УФ	С ударной фильтрацией в сливной и песковой камерах
ПК	С промывочной камерой в зоне выхода сгущенного продукта
МП	Многопродуктовый с несколькими концентрически расположенными сливными патрубками
МС	Многоступенчатый с последовательным соединением элементов
БН	Бинарный с подачей суспензии через единый входной патрубок
РП	С реактивным приводом, с помощью которого суспензии придается вращательное движение
ГЗ	Горизонтальный с центральным коническим обтеканием на входе и усеченной конусной вставкой на выходе
КБ	Комбинированный с фильтрующими элементами в цилиндрикоконической части
БО	Безнапорный открытый (без сливного патрубка)
ВТ	С вращающейся турбиной (турбоциклон)

Производство гидроциклонов малого размера и батарейных мультициклонов из пластмассы освоено для крахмалопаточной промышленности. Для широкого диапазона расходов, гранулометрических характеристик взвешенных частиц и эксплуатационных условий при



разделении технологических суспензий и очистке сточных вод разработаны типоразмерные ряды единичных и батарейных гидроциклонов.

Таблица 3.2 – Условные обозначения конструкционного материала, применяемого в гидроциклонах

Условное обозначение	Конструкционный материал деталей, соприкасающихся с разделяемой смесью
1	2
У	Углеродистые стали
Л	Легированные стали
К	Коррозионно-стойкие высоколегированные стали
Н	Неметаллические материалы и керамика
П	Пластмассовые покрытия
Г	Гуммированные покрытия
Э	Эмалированные покрытия

Для разделения суспензий с относительно слабыми агрессивными и абразивными свойствами разработан типоразмерный ряд высокоэффективных и технологичных пластмассовых гидроциклонов типа ТВП, включающий семь типоразмеров диаметром 25...100 мм, производительностью 1,5...20 м<sup>3</sup>/ч и давлением 0,3 МПа (таблица 3.3). Гидроциклоны изготовляют литьем под давлением из полиамида ПА-6 [32].

Таблица 3.3 – Конструктивные размеры гидроциклонов типа ТВП

Типоразмер	Внутренний диаметр корпуса, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
1	2	3	4	5
ТВП-25	25	1,5	90×120×400	0,18
ТВП-32	32	2,5	95×120×500	0,3
ТВП-40	40	3,6	100×140×600	0,47
ТВП-50	50	6	150×180×650	0,62
ТВП-63	63	9	160×180×760	0,81
ТВП-80	80	14	170×280×840	1,33
ТВП-100	100	20	220×320×910	2,1

Для использования в более тяжелых эксплуатационных условиях (при широком интервале температур и давлений, во взрыво- и пожароопасных, агрессивных и абразивных средах) создан типоразмерный ряд гидроциклонов типа ТВ, изготавливаемых из легированных или углеродистых сталей (таблица 3.4). Разработанный ряд включает 10 типоразмеров диаметром 25...200 мм, с расчетной производительностью 1,5...200 м<sup>3</sup>/ч, давлением 0,3 МПа.

Таблица 3.4 – Конструктивные размеры гидроциклонов типа ТВ

Типоразмер	Внутренний диаметр корпуса, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
1	2	3	4	5
ТВ-25	25	1,3	120×90×380	4
ТВ-32	32	2,2	125×100×460	5
ТВ-40	40	3,3	150×108×540	7
ТВ-50	50	5,2	180×140×650	11
ТВ-63	63	7,2	190×170×760	15
ТВ-80	80	12	220×170×840	20
ТВ-100	100	19	270×210×910	25
ТВ-125	125	30	310×250×1000	30
ТВ-150	150	42	380×275×1120	40
ТВ-200	200	74	430×300×1250	70

Гидроциклоны малых диаметров объединяются в батареи и блоки (мультициклоны), что позволяет при обеспечении требуемого эффекта очистки и производительности добиться максимальной компактности установки.

Батарейные гидроциклоны имеют единую систему питания, а также системы сбора верхнего и нижнего продуктов разделения (таблица 3.5).

Гидроциклоны батарейные применяются для очистки оборотных и сточных вод от мелкодисперсных взвесей, для разделения и сгущения технологических суспензий.

Конструкция батарейных гидроциклонов характеризуется следующими особенностями:

1. конструкция разборная с индивидуальной, радиальной обвязкой гидроциклонов вокруг центрального коллектора или гидроциклона предварительной очистки;
2. обеспечивает возможность широкого варьирования производительностей;
3. может компоноваться из металлических или пластмассовых гидроциклонов.

Таблица 3.5 – Конструктивные размеры батарейных гидроциклонов

Типоразмер	Внутренний диаметр корпуса, мм	Производительность **, м <sup>3</sup> /ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
1	2	3	4	5
Батарейные гидроциклоны с центральным коллектором				
БГЦ-25×8	25	10	360×400×750	25
БГЦ-25×16	25	20	590×580×890	35
БГЦ-40×6	40	20	720×800×1300	80
БГЦ-40×12	40	40	720×800×1300	100
БГЦ-63×6	63	43	800×900×1800	110
БГЦ-63×12	63	86	840×900×1800	120
БГЦ-80×4	80	46	820×950×2200	100
БГЦ-80×8	80	92	900×950×2200	120
Батарейные гидроциклоны с гидроциклоном предварительной очистки				
БГЦ-100/25×8	25(100)*	10	360×400×750	30
БГЦ-150/25×16	25(100)*	20	590×400×750	40
БГЦ-150/40×8	40(150)*	20	700×800×1300	90
БГЦ-200/40×12	40(200)*	40	720×800×1300	120

\* – в скобках заданы диаметры гидроциклонов предварительной очистки

\*\* – производительность дана при давлении среды на входе – 0,3 МПа и отсутствия противодействия на выходах

Батарейные гидроциклоны обладают следующими преимуществами:

1. компактность в сочетании с высокой удельной производительностью;

2. повышенная эффективность разделения благодаря оптимизированной форме, размерам и высокому качеству проточной части гидроциклонов;
3. повышенная надежность работы за счет предварительного выделения крупных включений;
4. удобство обслуживания и ремонта.

Назначение мультициклонов – разделение тонкодисперсных суспензий. Применяются для промывки твердой фазы технологических суспензий в пищевой и химической промышленности, а также для тонкой очистки сточных вод от механических примесей.

Микроциклоны диаметром 10 мм объединены в единый блок из полипропилена по 66 штук, что позволяет при сохранении основных рабочих параметров значительно уменьшить габаритные размеры. Количество блоков в одном мультигидроциклоне составляет 1, 2 или 3 штуки. При больших производительностях возможно изготовление мультигидроциклонных установок, состоящих из нескольких соединенных последовательно мультигидроциклонов.

Основные геометрические размеры и технологические параметры мультигидроциклонов приведены в таблице 3.6 (давление на входе – 0,8 МПа).

Таблица 3.6 – Конструктивные размеры мультигидроциклонов, выпускаемых НПП «Экол НН» г.Дзержинск

Тип, марка	Количество блоков	Производительность, м <sup>3</sup> /ч.	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
МГЦ -1	1	20	635×635×1450	98
МГЦ - 2	2	40	635×635×1650	115
МГЦ - 3	3	60	635×635×1800	135

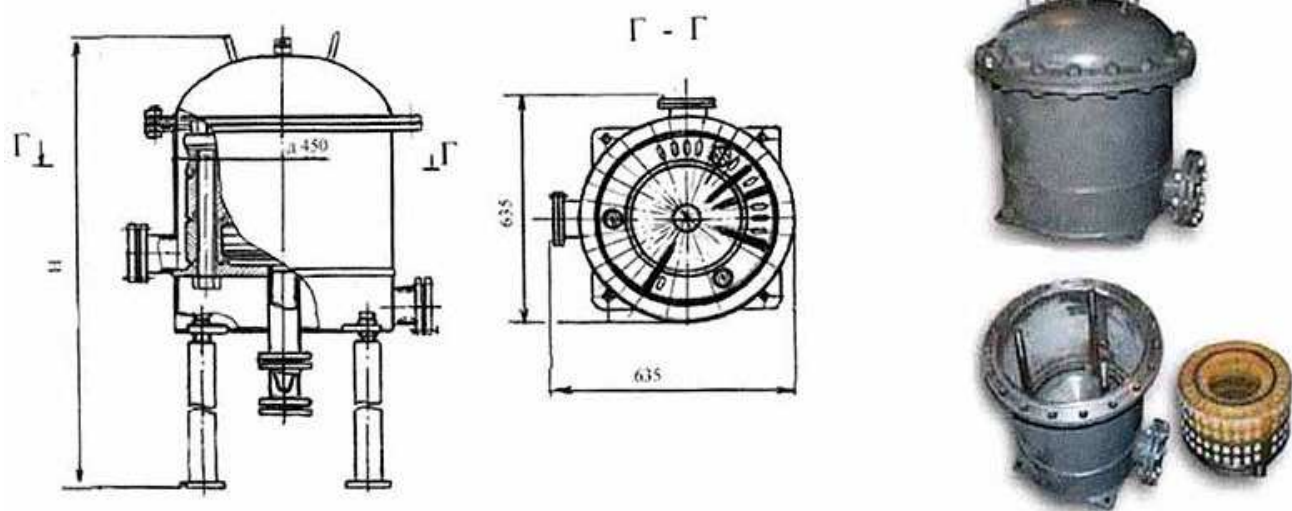


Рисунок 3. 11 – Мультигидроциклоны

### **Контрольные вопросы:**

1. Из каких основных элементов состоит гидроциклон?
2. Какие материалы используются при изготовлении гидроциклонов?
3. В чем состоит отличие аппаратов, в которых разделение происходит под действием центробежных сил?
4. Назовите основные виды гидроциклонов.
5. Виды конических гидроциклонов.
6. В чем заключается различие между мультициклоном и батарейным гидроциклоном?
7. Какие обозначения рекомендуются для маркировки гидроциклонов?
8. Какого типоразмера гидроциклон рекомендуется для работы с относительно слабыми агрессивными и абразивными суспензиями? при тяжелых эксплуатационных условиях?
9. Назначение мультициклонов батарейных гидроциклонов.
10. Какой вид гидроциклонов наиболее распространен в промышленности?

## ГЛАВА 4

### РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Гидроциклоны широко применяются в промышленности в разных промышленных схемах. В данном разделе рассмотрены два цикла работы гидроциклона [12, 39]: открытый (рисунок 4.1 А) и закрытый (рисунок 4.1Б).

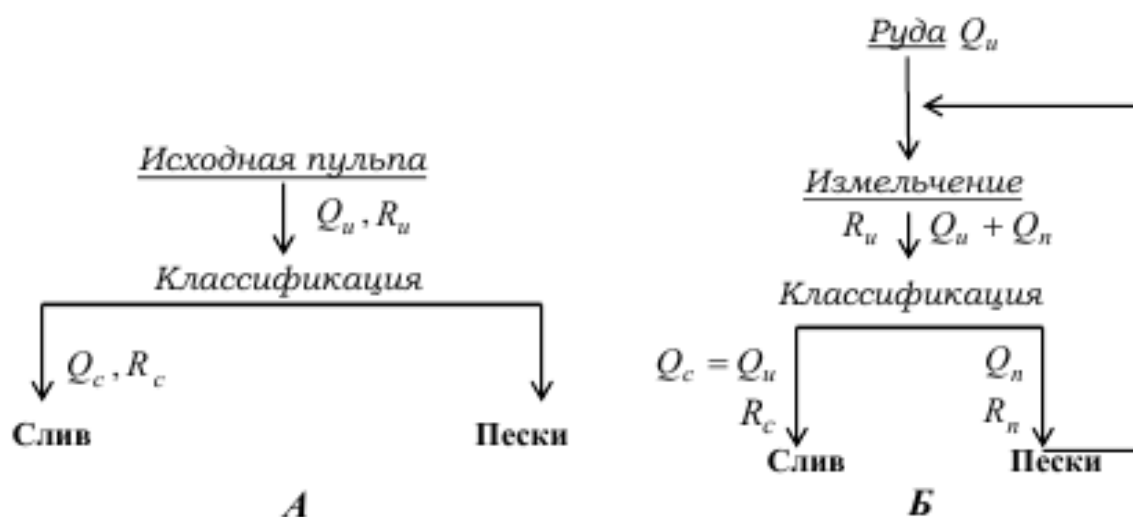


Рисунок 4.1 – Открытый цикл (А) и закрытый цикл (Б) работы гидроциклона

При выборе и расчете гидроциклона необходимо учитывать характеристики суспензии; требования к продуктам; особенности производства, для которого проектируется гидроциклон.

Расчет гидроциклона включает в себя не только технологический расчет, но и гидравлический. В технологическом расчете определяются основные параметры гидроциклона, его производительность и характеристика сливов. Гидравлический расчет сводится к определению перепада давления на входе и выходе аппарата. Заключительным этапом расчета является расчет турбулентной эффективности гидроциклона.

#### 4.1 Математическое моделирование гидроциклонов

В самом начале технологического расчета должны быть четко сформулированы требования, которые предъявляются к гидроциклонам и исходные условия при их эксплуатации. Эти требования определяются особенностью выполняемой операции.

При моделировании и анализе операции классификации (обесшламливания), не связанной с замкнутым циклом измельчения исходными

данными являются разжижение и гранулометрический состав начальной пульпы, а также крупность слива. Крупность слива может быть выражена содержанием определенного класса в сливе.

Для моделирования работы гидроциклона в замкнутом цикле с мельницей исходными параметрами являются максимальная рабочая циркулирующая нагрузка, крупность слива, выход слива.

#### 4.1.1 Гидроциклон в открытом цикле измельчения

Гидроциклон оптимальной конструкции имеет следующие геометрические соотношения [7]:

$$\frac{L}{D} = 5; \frac{d_{\text{пит}}}{D} = 0,28; \frac{d_{\text{сл}}}{D} = 0,34.$$

Ориентировочные данные для предварительного выбора стандартных гидроциклонов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Ориентировочные значения рабочих параметров стандартных гидроциклонов

Диаметр гидроциклона $D$ , мм	Угол конусности $\alpha^\circ$	Производительность (при $P_{\text{вх}}=0,1$ МПа) $Q$ , м <sup>3</sup> /ч	Номинальная крупность слива $d_{\text{ном}}$ , мкм	Стандартный эквивалентный диаметр питающего отверстия $d_{\text{пит}}$ , см	Стандартный диаметр сливного патрубка $d_{\text{сл}}$ , см	Диаметр песковой насадки $\Delta$ , см
1	2	3	4	5	6	7
25	10	0,45-0,9	8	0,6	0,7	0,4-0,8
50	10	1,8-3,6	10	1,2	0,13	0,6-1,2
75	10	3-10	10-20	1,7	2,2	0,8-1,7
150	10; 20	12-30	20-50	3,2-4	4-5	1,2-3,4
250	20	27-70	30-100	6,5	8	2,4-7,5
350	20	50-130	40-150	9	11,5	3,4-9,6
500	20	100-260	50-200	13	16	4,8-15
710	20	200-460	60-250	15	20	4,8-20
1000	20	360-900	70-280	21	25	7,5-25
1400	20	700-1800	80-300	30	38	15-36
2000	20	1100-3600	90-330	42	52	25-50

Производительность выбранного гидроциклона уточняется по формуле (4.1):

$$Q = 15,5k_D k_\alpha d_{\text{пит}} d_{\text{сл}} \sqrt{P_{\text{вх}}}; \quad (4.1)$$

$$k_D = 0,8 + \frac{1,2}{1 + 0,1D};$$

$$k_\alpha = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \tan \frac{\alpha}{2}}.$$

Формула носит эмпирический характер, поэтому  $d_{\text{пит}}, d_{\text{сл}}, D$  подставляется в см,  $P_{\text{вх}}$  в кгс/см<sup>2</sup>. По данной формуле  $Q$  получается в л/мин, чтобы можно произвести проверку с табличными данными необходимо перевести  $Q$  в м<sup>3</sup>/ч, разделив рассчитанное значение  $Q$  на 16,67. Для перевода давления на входе в аппарат необходимо воспользоваться следующим соотношением: 1 МПа=10,2 кгс/см<sup>2</sup>.

Нижние допустимые пределы давления на входе в гидроциклон зависят от целого ряда исходных условий: обычно для гидроциклонов открытого цикла давление на входе не должно быть менее 0,4 кгс/см<sup>2</sup> (0,039 МПа), а для гидроциклонов замкнутого цикла – не менее 0,8 кгс/см<sup>2</sup> (0,078 МПа).

Диаметр сливного патрубка  $d_{\text{сл}}$  принимается стандартным, либо равным 0,2-0,3  $D$  и в редких случаях 0,4  $D$  (меньшие значения следует применять для более тонкого слива).

При установке нескольких параллельно работающих гидроциклонов их число определяется как частное от деления общей объемной производительности  $Q_0$  на производительность одного гидроциклона  $Q$ :

$$n = \frac{Q_0}{Q}. \quad (4.2)$$

При работе гидроциклонов в открытом цикле характеристика крупности питания предполагается заданной.

Ход расчета качественных показателей зависит от исходных заданных параметров. В том случае, если требуется определить качественные показатели работы гидроциклона, зная только характеристику крупности питания, поступают следующим образом. Для определения гранулометрического состава слива и песков гидроциклонов сначала определяют крупность граничного зерна.



Крупность граничного зерна  $\delta_r$  (мкм) определяется по формуле (4.3), последняя справедлива для гидроциклонов с углом конусности двадцать градусов:

$$\delta_r = 1,5 \sqrt{\frac{d_{сл} Da}{\Delta k_D \sqrt{P_{вх}} (\rho_T - \rho_ж)}}, \quad (4.3)$$

где  $D$ ,  $d_{сл}$  и  $\Delta$  – диаметр соответственно гидроциклона, сливного патрубка, песковой насадки, см;  $P_{вх}$  – давление на входе, кгс/см<sup>2</sup>;  $a$  – содержание твердого в питании, %;  $\rho_T$  и  $\rho_ж$  – плотность твердой и жидкой фаз пульпы, г/см<sup>3</sup>; 1,5 – эмпирический коэффициент.

Определив крупность граничного зерна, находят выходы слива и песков. Выход слива приблизительно равняется содержанию в питании класса минус граничное зерно, а выход песков – содержанию класса плюс граничное зерно.

Далее вычисляют извлечение продукта  $\varepsilon$  узких классов в слив по формуле (4.4):

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_B}{\left(\frac{\varepsilon_B}{\gamma} - 1\right) \left(\frac{\delta}{\delta_r}\right)^m + 1}; \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{(c)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\gamma_c} - 1\right) x^m + 1};$$

$$x = \frac{\delta}{\delta_r};$$

$$\gamma_c = \frac{\gamma}{\varepsilon_B};$$

$$\varepsilon_{(c)} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_B};$$

$$\varepsilon_B = \frac{(1 - c) a \gamma}{c(1 - a)},$$

где  $\varepsilon_B$  – извлечение воды в слив;  $\delta$  – класс извлекаемого продукта;  $\varepsilon_{(c)}$  – скорректированный слив узких классов;  $\gamma$  и  $\gamma_c$  – выход слива расчетное и скорректированное;  $a$  и  $c$  – содержание твердого в питании и сливе.

В этом уравнении показатель степени  $m$  может изменяться в зависимости от крупности зерен и концентрации твердого. В большинстве случаев  $m$  колеблется от 2,7 до 3,7. Уравнение отвечает граничным условиям. При  $\delta_i = 0$   $\varepsilon = \varepsilon_B$ , т.е. самые тонкие зерна извлекаются так же, как вода; при  $\delta_i = \delta_\gamma$   $\varepsilon = \gamma$ . При увеличении отношения  $\delta_i/\delta_\gamma$  более 4-5  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

Если величина  $\epsilon_b$  неизвестна, она может быть вычислена по уравнению баланса (4.5), в котором величиной содержания твердого в песках необходимо задаться. Она обычно составляет 0,65-0,8 (колебания в этих пределах мало отражаются на величине  $\epsilon_b$ ).

$$c = \frac{aby}{b - a(1 - \gamma)} \quad (4.5)$$

Извлечение узких классов в слив может быть определено также с помощью рисунка 4.2. для этого надо найти на нем извлечение каждого узкого класса при заданном выходе слива. Затем скорректировать найденное извлечение путем умножения его величины на отношение извлечения воды в заданном случае к извлечению воды, соответствующему заданному выходу на рисунке (верхняя кривая).

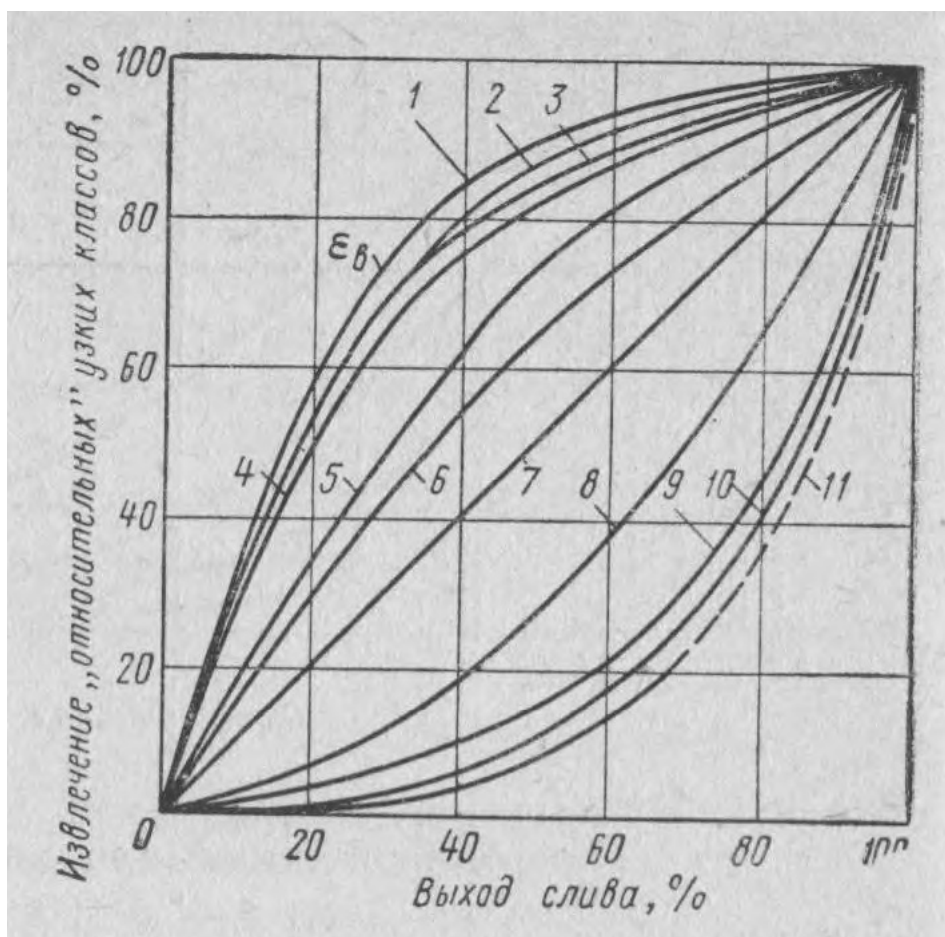


Рисунок 4.2 – Зависимость извлечения «относительных» узких классов в слив от его выхода (по данным практики):

1 –  $\epsilon_b$  и отношение  $\delta_i/\delta_r = 0,9$  отношение  $\delta_i/\delta_r$ ; 2 – 0,13; 3 – 0,18-0,25; 4 – 0,35; 5 – 0,5; 6 – 0,7; 7 – 1; 8 – 1,4; 9 – 2; 10 – 2,8; 11 – 4

После того, как найдено извлечение узких классов, рассчитывают их содержание в сливе и песках по формулам (4.6) и (4.7):

$$\Delta\beta = \frac{\varepsilon\Delta\alpha}{\sum_{\delta=0}^{\delta=\delta_{\max}} \varepsilon\Delta\alpha} = \frac{\varepsilon\Delta\alpha}{\gamma}, \quad (4.6)$$

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta\alpha - \gamma\Delta\beta}{1 - \gamma}, \quad (4.7)$$

где  $\Delta\beta$  – содержание узких классов в сливе;  $\Delta\vartheta$  – содержание узких классов в песках;  $\delta_{\max}$  – крупность максимальных зерен в питании.

Суммируя содержание узких классов в сливе или песках, начиная с самых крупных классов, получают характеристику крупности (по плюсу) слива и песков.

По кривым характеристики крупности слива и песков может быть определено содержание любого класса (по минусу) в этих продуктах.

Извлечение и эффективность классификации по любому классу (по минусу) могут быть рассчитаны обычным способом. Далее представлен расчет гидроциклона в открытом цикле измельчения [39].

**Пример расчета.** Требуется выбрать гидроциклон и ориентировочно рассчитать основные показатели его работы по следующим исходным данным. Гидроциклон предназначен для классификации хвостов первой стадии флотации с целью выделения отвального слива и песков, которые должны поступать на доизмельчение и дальнейшую флотацию. На обработку поступает  $85,8 \text{ м}^3/\text{ч}$  пульпы с содержанием твердого 44%, плотность которого  $2,8 \text{ г}/\text{см}^3$ . Характеристика ее крупности представлена кривой 1 (рисунок 4.3). Пульпа поступает в гидроциклон самотеком, под напором 8,5 м вод. ст. В слив требуется удалить материал, содержащий 80% класса -0,074 мм.

**Решение.** Ориентировочно определяем по таблице 4.1, что для заданной производительности  $85,8 \text{ м}^3/\text{ч}$  (1430 л/мин) необходим один гидроциклон диаметром 350 мм. Для определения размеров питающего и разгрузочных отверстий гидроциклона сначала из формулы (4.1) найдем произведение  $d_{\text{пит}}d_{\text{сл}}$ , учитывая, что гидроциклон стандартный с углом конусности  $20^\circ$ , для которого  $k_D = 1,05, k_\alpha = 1$ . Давление на входе в гидроциклон найдем из условия  $P_{\text{вх}} = 0,85\rho_{\text{п}}$ , где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность исходной пульпы. Откуда:

$$P_{\text{вх}} = 0,85 \frac{1}{0,56 + \frac{0,44}{2,8}} = 1,18 \text{ кгс}/\text{см}^2.$$

Принимаем  $P_{\text{вх}} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , тогда:

$$1430 = 15,5 \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot d_{\text{пит}} d_{\text{сл}} \sqrt{1};$$

$$d_{\text{пит}} d_{\text{сл}} = 88.$$

Отсюда  $d_{\text{пит}} = 0,8d_{\text{сл}}$ , следовательно:

$$d_{\text{сл}}^2 = \frac{88}{0,8} = 110 \text{ см}^2; \quad d_{\text{сл}} = 10,5 \text{ см}; \quad d_{\text{пит}} = 8,4 \text{ см}.$$

Эти размеры соответствуют стандартным.

Далее определяем крупность граничного зерна по формуле (4.3), задаваясь разгрузочным отношением 0,4:

$$\delta_r = 1,5 \sqrt{\frac{35 \cdot 44}{0,4 \cdot 1,05 \cdot 1,8 \sqrt{1}}} = 68 \text{ мкм}.$$

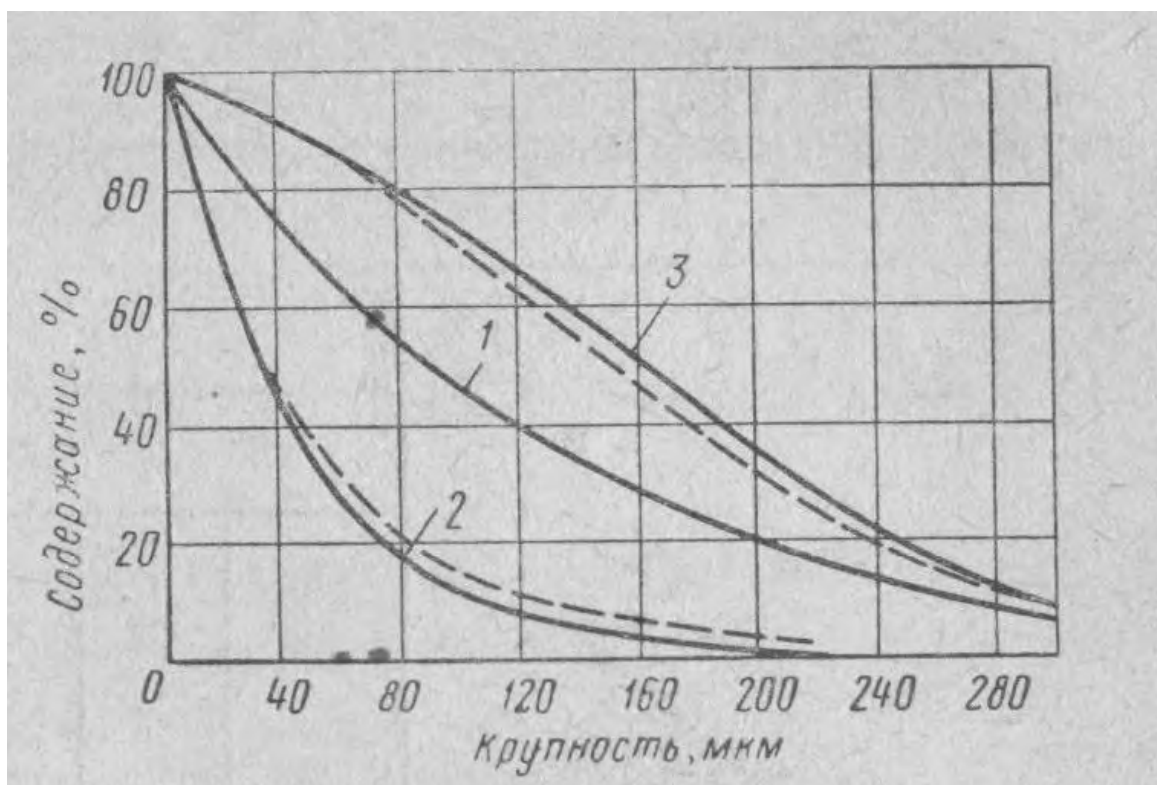


Рисунок 4.4 – характеристика крупности продуктов гидроциклона:

1 – питание; 2 – слив; 3 – пески

Найдем выход слива и песков по рисунку 4.4. На T-кривой 1 граничному зерну крупностью 68 мкм соответствует выход слива 42%, а выход песков – 58%. Определим нагрузку на песковую насадку. Количество твердого в питании составляет:

$$T = \frac{Q}{a' + \frac{1}{\rho_T}} = \frac{85,8}{\frac{56}{44} + \frac{1}{2,8}} = 52,7 \text{ т/ч.}$$

где  $a'$  – соотношение Ж:Т в исходной пульпе. Следовательно, количество песков и слива соответственно равняется:

$$T_{\text{п}} = 52,7 \cdot 0,58 = 30,5 \text{ т/ч;}$$

$$T_{\text{с}} = 52,7 \cdot 0,42 = 22,2 \text{ т/ч.}$$

Нагрузка на песковую насадку при ее диаметре:  $\Delta = 0,4d_{\text{сл}} = 0,4 \cdot 10,5 = 4,2 \text{ см}$  – составит:

$$\frac{30,5}{0,786 \cdot 4,2^2} = 2,2 \text{ т/см}^2 \text{ в час.}$$

Удельная нагрузка на песковую насадку в среднем составляет 0,5-2,5 т/ч на 1 см<sup>2</sup>. Расчетная нагрузка находится в пределах нормы.

Общее количество воды в пульпе равняется:

$$85,8 - \frac{52,7}{2,8} = 66 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

При нагрузке на песковую насадку 2,2 т/см<sup>2</sup> в час можно принять содержание твердого в песках  $b = 70\%$ , тогда количество воды, уходящей вместе с песками, будет равно:

$$30,5 \frac{30}{70} = 13 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Следовательно, количество воды, уходящей вместе со сливом, составит:

$$66 - 13 = 53 \text{ м}^3/\text{ч,}$$

а содержание твердого в сливе:

$$\frac{22,2}{22,2 + 53} = 29,2\%.$$

Извлечение воды в слив равняется:

$$\frac{53}{67} = 79,1\%.$$

Проверим далее крупность продуктов классификации.

Поскольку крупность слива задана содержанием класса -0,074 мм, а его содержание в питании равняется 44%, то извлечение этого класса в слив составит:

$$\varepsilon_{-0,074} = \frac{42 \cdot 80}{44} = 76,4\%.$$

Содержание класса -0,074 мм в песках находим из уравнения баланса:

$$\vartheta_{-0,074} = \frac{44 \cdot 100 - 42 \cdot 80}{58} = 17,9\%.$$

Порядок расчета содержания узких классов в продуктах классификации  
( $\delta_r = 0,068$  мм;  $\varepsilon_B = 0,79$ ;  $m = 2$ ;  $\gamma = 0,42$ )

показатель	Величина показателя							
	Крупность классов, мм							
	0,3	0,3-0,21	0,21-0,15	0,15-0,1	0,1-0,074	0,074-0,053	0,053-0,038	-0,038
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Средний диаметр $\delta_i$	0,37	0,255	0,180	0,125	0,087	0,063	0,045	0,019
$\frac{\delta_i}{\delta_r}$	5,45	3,75	2,65	1,97	1,28	0,93	0,66	0,28
$\left(\frac{\delta_i}{\delta_r}\right)^m$	29,7	14,1	7	3,9	1,64	0,86	0,43	0,078
$\left(\frac{\varepsilon_B}{\gamma} - 1\right) \left(\frac{\delta_i}{\delta_r}\right)^m + 1$	27,2	13,4	7,2	4,4	2,44	1,76	1,38	1,07
$\varepsilon_K$ , % по формуле 4.4	2,9	5,9	11	18	32,5	45	57,5	74
$\Delta\alpha$ , %	5	12	14	14	10	11	9	25
$\varepsilon_K \Delta\alpha$	0,14	0,71	1,53	2,52	3,25	5	5,2	18,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta\beta = \frac{\varepsilon_k \Delta\alpha}{\sum \varepsilon_k \Delta\alpha}, \%$	0,4	1,9	4,1	6,8	8,8	13,5	14	50,5
$\gamma\Delta\beta$	0,17	0,8	1,73	2,76	3,68	5,65	5,86	21,2
$\Delta\alpha - \gamma\Delta\beta$	4,83	11,2	12,27	11,24	6,32	5,35	3,14	3,8
$\Delta\nu = \frac{\Delta\alpha - \gamma\Delta\beta}{1 - \gamma}, \%$	8,3	19,3	21,2	19,4	10,9	9,2	5,4	6,5
$\varepsilon_B$ по рисунку 4.2	2	4	7	11	29	42	57	74

Крупность слива и песков, полученная по результатам расчета, на рисунке 4.4 показана пунктиром. Следует отметить, что расчетные по узким классам практически совпали с экспериментальными кривыми характеристики крупности соответствующих продуктов.

Извлечение узких классов определяется по рисунку 4.2 следующим образом. Сначала находится поправка на извлечение «относительных» узких классов, связанная с разным извлечением воды. Эта поправка представляет собой отношение извлечения воды для данного случая классификации к извлечению воды, определяемому по рисунку 4.2 при том же выходе (42%), т.е.  $79,1/85 = 0,93$ . Скорректированное извлечение «относительных» узких классов находится путем перемножения извлечения этих классов, найденного по рисунку 4.2 при выходе 42%, на эту поправку. Как видно, они отличаются от вычисленных по формуле не столь существенно (главным образом для относительно крупных классов).

#### 4.1.2 Гидроциклон в закрытом цикле измельчения

Для гидроциклонов, установленных в замкнутых циклах измельчения, характеристика крупности питания неизвестна, так как зависит от циркулирующей нагрузки.

При расчете этих гидроциклонов заданными являются:

1. схема цикла измельчения;
2. производительность, равная обычно производительности гидроциклонов по сливу и удельная производительность мельницы по расчетному классу;
3. крупность слива гидроциклонов, которая задается либо по содержанию определенного класса (по минусу), либо полной характеристикой крупности;
4. циркулирующая нагрузка, т.е. отношение количества песков к количеству слива (по твердому).

Определяется выход слива (от операции):

$$\gamma = \frac{1}{1 + C_n} \quad (4.8)$$

где  $C_n$  – циркулирующая нагрузка или часть этой нагрузки, представленная песками гидроциклона, доли единицы.

Находится ориентировочно содержание твердого в сливе для наибольшего гидроциклона, возможного к установке в данных конкретных условиях, по уравнению (4.9). В тех случаях, когда крупность слива задается по содержанию класса -0,044 мм, для определения содержания класса -0,074 мм можно воспользоваться графиком (рисунок 4.5).

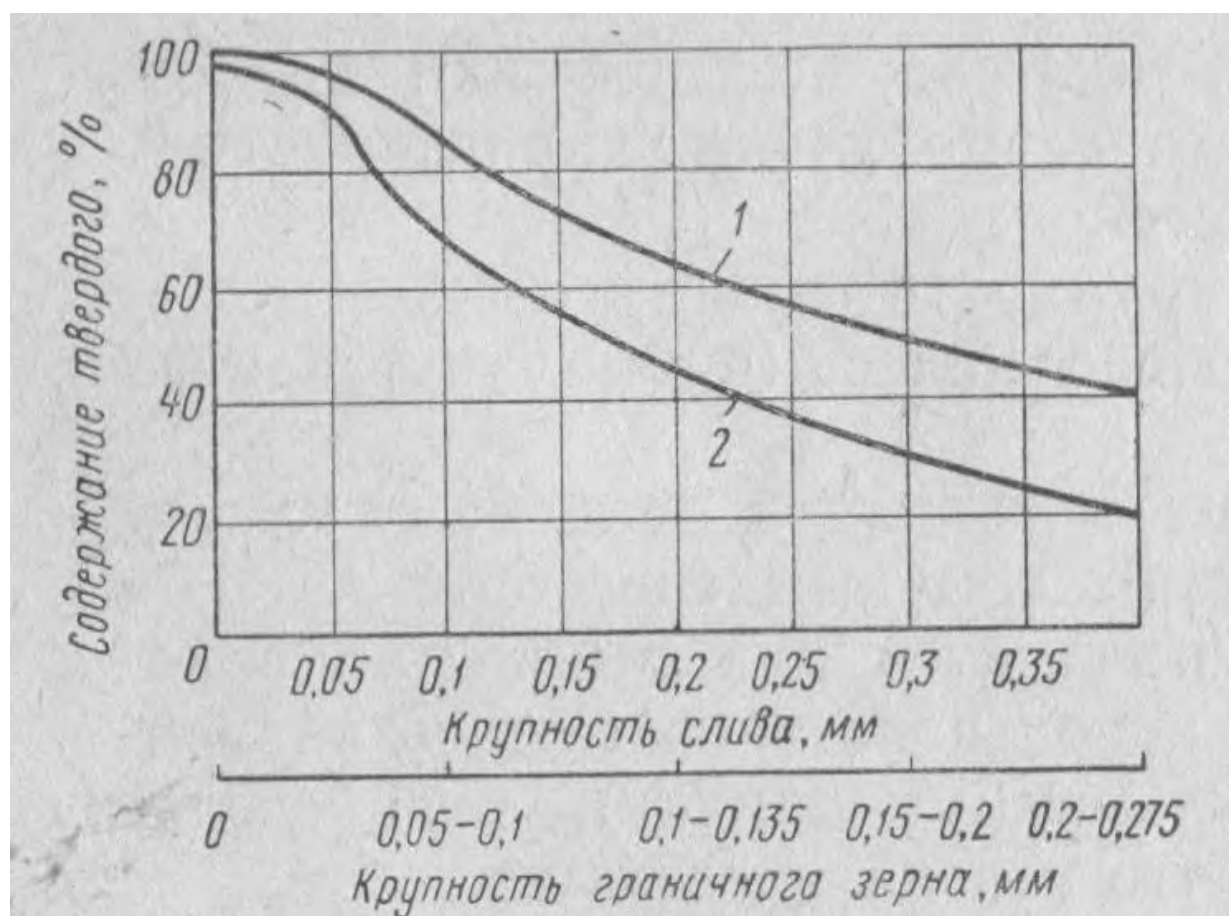


Рисунок 4.5 – Зависимость содержания классов -0,074 мм (1) и -0,044 мм (2) в сливе гидроциклонов от максимальной крупности слива

$$c = \frac{(k - 0,7\beta_{0,074})b\gamma}{b - (k - 0,7\beta_{0,074})(1 - \gamma)} \quad (4.9)$$

где  $k$  – коэффициент, приблизительно равный для гидроциклона диаметром 750 мм – 0,95; 500 мм – 1; 350 и 250 мм – 1,05. В связи с тем, что гидроциклоны диаметром 750 и 500 мм применяются для разделения продуктов более грубого



измельчения, а гидроциклоны диаметром 350 и 250 мм для продуктов более тонкого, можно принять по данным практики для первых из них содержание твердого в песках  $b = 0,7$ , а для вторых  $b = 0,65$ .

Если расчет показывает, что плотность слива в большом гидроциклоне недостаточна для последующих операций обогащения, разрабатываются варианты получения слива требуемой плотности (применение гидроциклонов меньшего размера, второго приема классификации, циркуляции слива и пр.).

Определяется содержание твердого в питании гидроциклонов при содержании твердого в песках 65-80%.

Находится объемная производительность по сливу ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) по формуле:

$$Q_c = T_c \left( \frac{1}{\rho_T} - \frac{1-c}{c} \right), \quad (4.10)$$

где  $T_c$  – производительность измельченного цикла, т/ч;  $c$  – содержание твердого в сливе, доли единицы;  $\rho_T$  – плотность твердой фазы пульпы,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Находится производительность песков (по твердому) из выражения (4.11):

$$T_{\text{п}} = T_c C_{\text{п}}. \quad (4.11)$$

Вычисляется объемная производительность по пескам ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ):

$$Q_{\text{п}} = T_{\text{п}} \left( \frac{1}{\rho_T} - \frac{1-b}{b} \right). \quad (4.12)$$

При этом содержание твердого в песках принимается таким же, какое было принято при вычислении плотности слива.

Объемная производительность гидроциклонов по исходной пульпе равняется:

$$Q_0 = Q_{\text{п}} + Q_c. \quad (4.13)$$

Диаметр песковой насадки ориентировочно подсчитывается по формуле (4.14):

$$A = c \left( \frac{\Delta}{d_{\text{сл}}} \right)^3, \quad (4.14)$$

где  $A$  – разгрузочное отношение.

В процессе пуска и наладки гидроциклонов диаметр песковой насадки должен быть откорректирован.

Построение кривой характеристики крупности питания на основе извлечения узких классов производится следующим образом. Сначала вычисляется извлечение узких классов  $\varepsilon_{\text{кк}}$  по формуле (4.15), затем количество каждого узкого класса в сливе  $\gamma\Delta\beta$  (в долях от питания) и содержание узких классов в питании  $\Delta\alpha = \gamma\Delta\beta/\varepsilon_{\text{кк}}$ .

Расчет по этой формуле производится только для продуктов крупностью мельче граничного зерна. После этого, если задана характеристика крупности продукта, поступающего в цикл измельчения, можно определить содержание в питании наиболее крупных классов (только для таких схем измельчения, когда исходный продукт поступает в гидроциклоны, а не в мельницу).

В этом случае:

$$\Delta\alpha'_{\text{макс}} = \frac{\Delta\alpha_{\text{макс}}}{1 + C}, \quad (4.15)$$

где  $\Delta\alpha'_{\text{макс}}$  – содержание крупного класса в питании гидроциклонов;  $\Delta\alpha_{\text{макс}}$  – содержание того же класса в исходном продукте (его можно принять равным 10%);  $C$  – циркулирующая нагрузка.

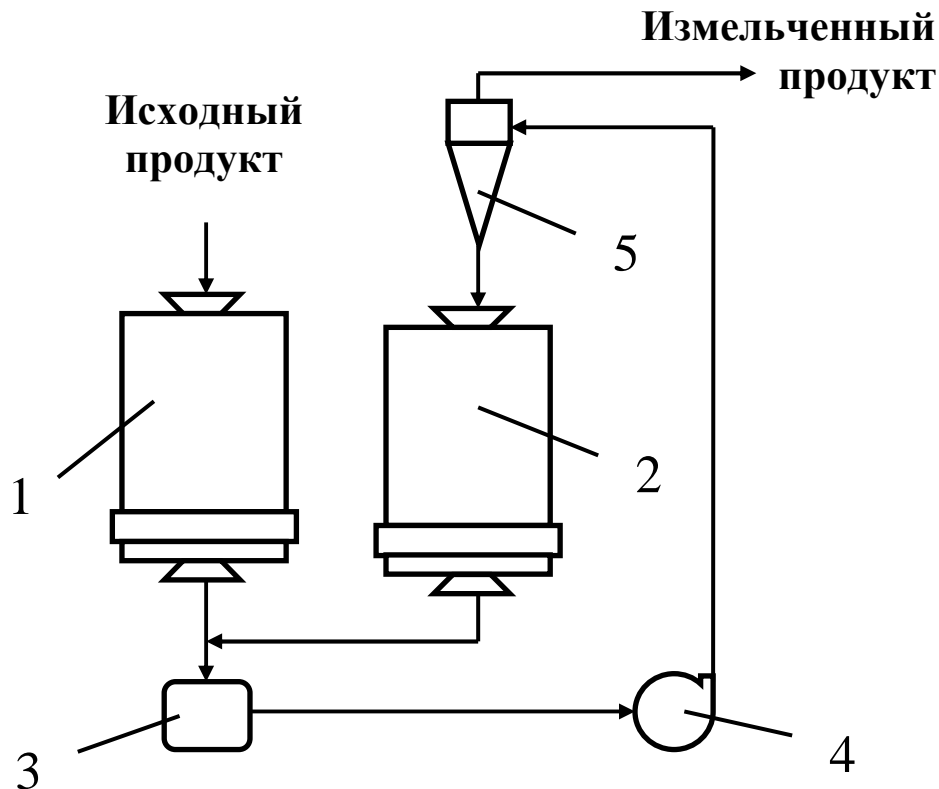


Рисунок 4.6 – Гидроциклон в закрытом цикле измельчения

1 – стержневая мельница; 2 – шаровая мельница; 3 – зумпф насоса; 4 – насос;  
5 – гидроциклон

Далее суммируется содержание узких классов крупностью мельче граничного зерна и с учетом содержания крупных классов строится кривая характеристики крупности питания.

Дальнейшие расчеты производятся так же, как и для гидроциклонов, работающих в открытом цикле. Далее представлен расчет гидроциклона в закрытом цикле измельчения [39].

**Пример расчета.** В результате измельчения продукта крупностью класса -0,074 мм с содержанием твердого 44% требуется получить слив с содержанием этого класса 80% в шаровой мельнице производительностью 52,7 т/ч, работающей по схеме, изображенной на рисунке 4.6, с циркулирующей нагрузкой 138%.

**Решение.** Определяем выход слива от операции по формуле (4.8):

$$\gamma = \frac{1}{1 + 1,38} = 0,42.$$

Находим ориентировочно содержание твердого в сливе по рисунку 4.7:

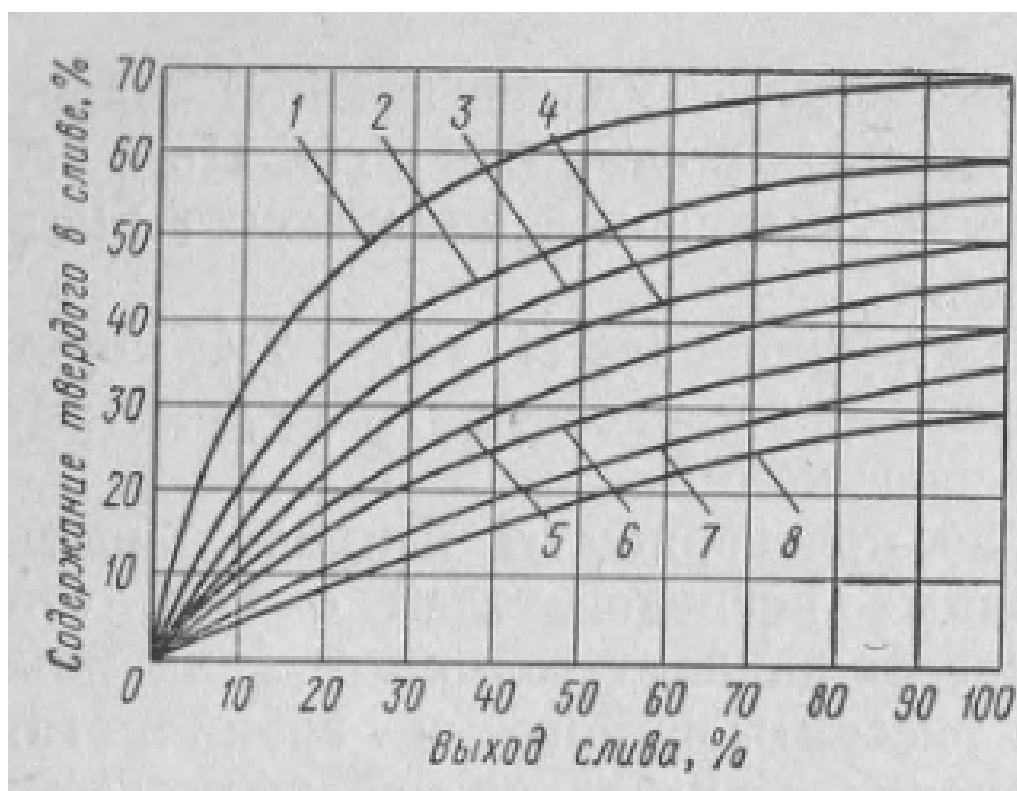


Рисунок 4.7 – График для ориентировочного определения содержания твердого в сливе гидроциклонов, работающих в замкнутых иклах измельчения:

1 – содержание твердого в питании 70%, содержание твердого в песках 80%; 2 – то же, 60% и 75%; 3 – то же, 55% и 72%; 4 – то же, 50% и 70%; 5 – то же, 45% и 70%; 6 – то же, 40% и 70%; 7 – то же, 35% и 67%; 8 – то же, 30% и 65%

$$c \cong 30 - 36\%.$$

Для гарантии принимаем  $c = 30\%$ .

Расход воды со сливом составляет:

$$52,7 \frac{70}{30} = 123 \text{ м}^3/\text{ч},$$

а с исходным питанием:

$$52,7 \frac{56}{44} = 86,3 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Следовательно, в зумпф насоса, питающего гидроциклон, должно добавляться воды:

$$123 - 86,3 = 36,7 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Определяем объемную производительность по формуле (4.10):

$$Q_c = \frac{52,7}{2,8} + 123 = 142 \text{ м}^3/\text{ч},$$

а производительность по пескам (по твердому) из формулы (4.11):

$$T_{\Pi} = 52,7 \cdot 1,38 = 73,3 \text{ т/ч}.$$

Задаемся содержанием твердого в песках  $b = 70\%$ , тогда расход воды с песками составит:

$$73,3 \frac{30}{70} = 31,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Вычислим объемную производительность по пескам по формуле (4.12):

$$Q_{\Pi} = \frac{73,3}{2,8} + 31,4 = 58 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Объемная производительность по исходной пульпе составит:

$$Q_0 = 142 + 58 = 200 \text{ м}^3/\text{ч},$$

а производительность по твердому:

$$52,7 + 73,3 = 126 \text{ т/ч.}$$

Содержание твердого в питании гидроциклонов, считая, что ни в мельницу, ни в ее разгрузку не добавляется вода, будет равно:

$$\frac{126}{154,4 + 52,7 + 73,3} = 45\%.$$

Ориентируясь на стандартный гидроциклон диаметром 500 мм, определяем из формулы (4.1) размеры его питающего и сливного отверстий, принимая давление на входе  $1,5 \text{ кгс/см}^2$ :

$$200 = 15,5 \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot d_{\text{пит}} d_{\text{сл}} \sqrt{1,5};$$
$$d_{\text{пит}} d_{\text{сл}} = 174.$$

Считая  $d_{\text{пит}} = 0,8d_{\text{сл}}$ , следовательно:

$$d_{\text{сл}}^2 = 216 \text{ см}^2; \quad d_{\text{сл}} = 14,7 \text{ см}; \quad d_{\text{пит}} = 11,7 \text{ см.}$$

Диаметр песковой насадки ориентировочно определяется по формуле (4.14):

$$\Delta = 14,7 \sqrt[3]{\frac{58}{4,4 \cdot 142}} = 6,6 \text{ см.}$$

Далее определяем крупность граничного зерна по формуле (4.3), задаваясь разгрузочным отношением 0,4:

$$\delta_r = 1,5 \sqrt{\frac{14,7 \cdot 50 \cdot 45}{6,6 \cdot 1,8 \sqrt{1,5}}} \cong 72 \text{ мкм.}$$

Далее рассчитываются характеристики крупности питания и песков по узким классам.

Извлечение воды в слив:

$$\varepsilon_{\text{в}} = \frac{123}{154,4} = 0,8 \text{ (80\%)},$$

затем извлечение узких классов в слив:

$$\varepsilon_k = \frac{0,8}{0,9 \left( \frac{\delta_i}{\delta_{\Gamma}} \right)^2 + 1}$$

Содержание в питании гидроциклонов наиболее крупного класса (+0,3 мм) составит:

$$\Delta\alpha'_{\text{макс}} = \frac{0,05}{1 + 1,38} = 0,021 \text{ (2,1\%)}$$

Результаты расчета крупности питания и песков гидроциклона, работающего в замкнутом цикле измельчения

показатель	Величина показателя							
	Крупность классов, мм							
	0,3	0,3-0,21	0,21-0,15	0,15-0,1	0,1-0,074	0,074-0,053	0,053-0,038	-0,038
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta\beta, \%$	0,1	0,9	2,8	6,9	9,9	15,6	15,5	48,3
Извлечение в слив, %	-	-	-	-	34,6	50	59	76,5
$\Delta\alpha, \%$	2,1	-	-	-	12,1	13,1	11	26,5
$\alpha, \%$	100	97,9	-	-	12,7	50,6	37,5	26,5
$\Delta\vartheta, \%$	3,7	-	-	-	13,6	11,3	7,8	10,9
$\vartheta, \%$	100	96,3	-	-	43,6	30	18,7	10,9

## 4.2 Гидравлический расчет

Гидравлический расчет гидроциклона сводится к расчету перепада давления между входом и выходом жидкости в аппарате.

Перепад давления  $\Delta p$  зависит от критерия Рейнольдса во входном патрубке  $Re_{\text{вх}}$ , производительности гидроциклона по начальной суспензии  $Q_{\text{вх}}$  и по очищенной массе  $Q_{\text{оч}}$ , от длины гидроциклона  $L$  (т.е. высота гидроциклона), его диаметра  $D_{\text{нс}}$ , диаметра входного патрубка  $d_{\text{пит}}$  и диаметра

патрубка для очищенной массы  $d_{сл}$ . Кроме того, на величину  $\Delta p$  влияет режим работы гидроциклона [7], т.е. наличие воздушного столба. Следовательно, гидравлическое сопротивление гидроциклона рассчитывается в зависимости от режима работы гидроциклона, а именно:  
для гидроциклона без воздушного столба:

$$\Delta p = Eu \rho_{жс} u_{вх}^2; \quad (4.16)$$

для гидроциклона с воздушным столбом:

$$\Delta p = 0,5 Eu \rho_{жс} u_{вх}^2; \quad (4.17)$$

где  $\rho_{жс}$  – плотность жидкости на входе в гидроциклон;  $Eu$  – критерий Эйлера, который находится из эмпирического уравнения (4.18) [4, 7]:

$$Eu = 1 + \varepsilon \gamma \left( \frac{d_{пит}}{d_{сл}} \right)^n \left( \frac{D_{hc}}{L} \right)^{0,7} \left( \frac{Q_{оч}}{Q_{вх}} \right)^{0,8} A, \quad (4.18)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий шероховатость стенок;  $\gamma$  и  $n$  – постоянные, зависящие от размеров элементов гидроциклона;  $A$  – величина, зависящая от критерия  $Re_{вх}$ .

Для гидроциклона оптимальной конструкции [7]:

$$Eu = 1 + 3,5 A \varepsilon \left( \frac{Q_{оч}}{Q_{вх}} \right)^{0,8}. \quad (4.19)$$

Критерий Рейнольдса находится по выражению (4.18):

$$Re_{вх} = \frac{d_{пит} u_{вх} \rho_{жс}}{\mu_{жс}}, \quad (4.20)$$

где  $u_{вх}$  – скорость суспензии во входном патрубке, м/с:  $u_{вх} = 4Q_{вх}/\pi d_{пит}$ . Критерий Рейнольдса для гидроциклона оптимальной конструкции [7]:

$$Re_{вх} = 6,5 \frac{d_{ч}^2 (\rho_{т} - \rho_{ж}) \Delta p}{\mu_{жс}^2}, \quad (4.21)$$

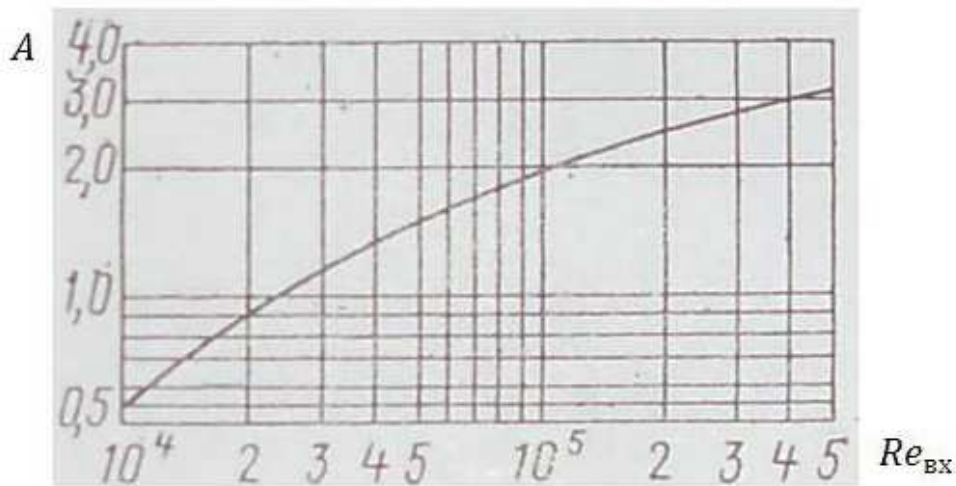


Рисунок 4.8 – График зависимости  $A = f(Re_{вх})$

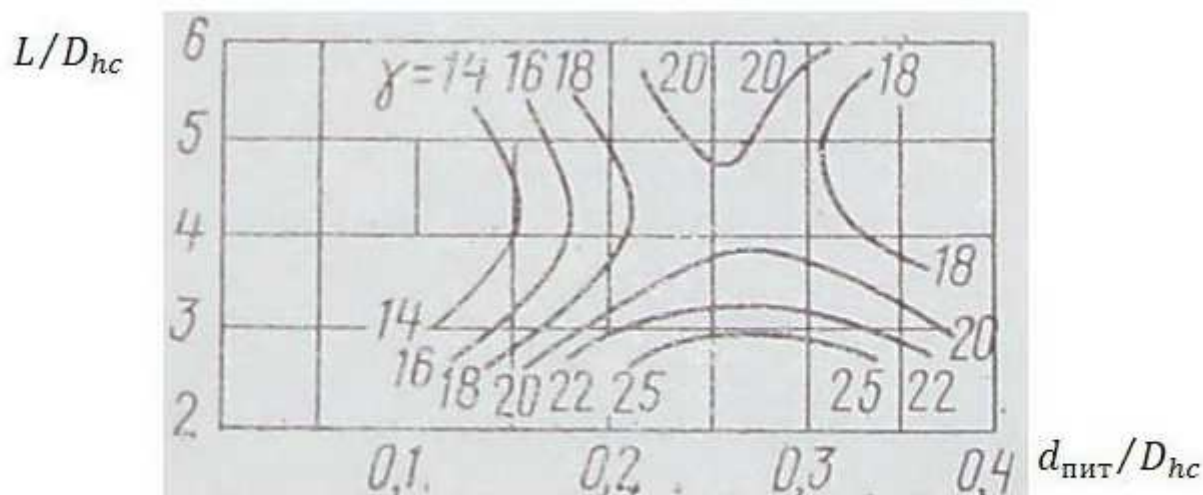


Рисунок 4.9 – График зависимости  $\gamma = \varphi(L/D_{нс}; d_{пит}/D_{нс})$

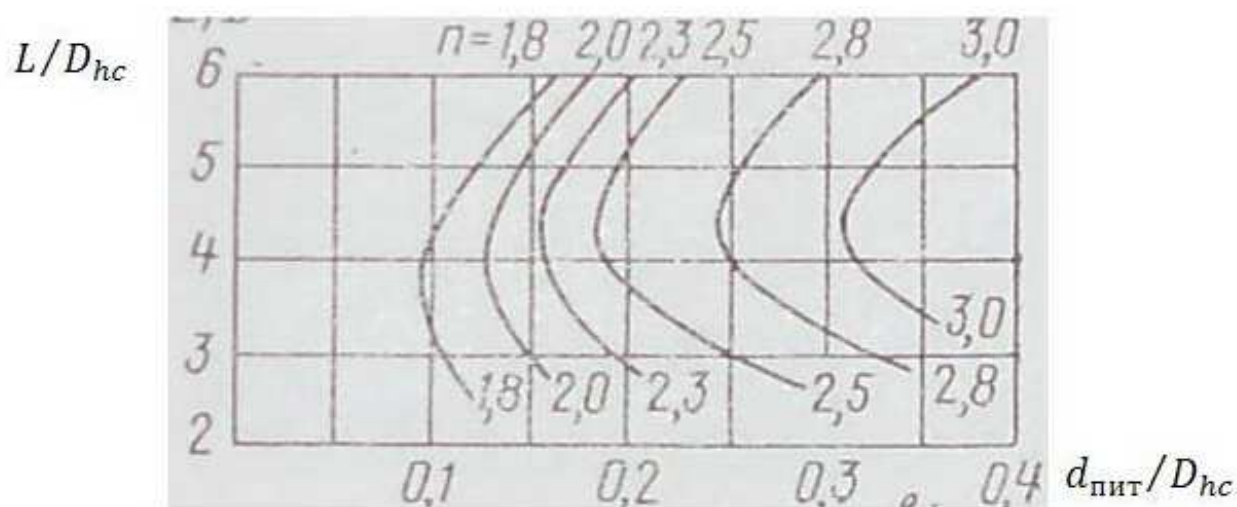


Рисунок 4.10 – График зависимости  $n = \psi(L/D_{нс}; d_{пит}/D_{нс})$



Значение  $A$  находится по рисунку 4.8 в зависимости от  $Re_{вх}$ ;  $\gamma$  – по рисунку 4.9 в зависимости от отношений  $L/D_{hc}$  и  $d_{пит}/D_{hc}$ ;  $n$  – по рисунку 4.10 в зависимости от отношений  $L/D_{hc}$  и  $d_{пит}/D_{hc}$ .

Далее приводятся различные примеры расчета [7].

**Пример расчета 1.** В гидроциклоне оптимальной конструкции диаметром 76 мм очищается бумажная масса. Ее плотность  $1000 \text{ кг/м}^3$ , вязкость 1,5 спуаз, плотность частиц  $2800 \text{ кг/м}^3$ . Производительность гидроциклона 80 л/мин. Определить минимальный диаметр улавливаемых частиц. Стенки гидроциклона гладкие ( $\epsilon=1$ ).

**Решение.** Рабочая длина гидроциклона  $L = 5 \cdot 76 \text{ мм}$ . Диаметр входного патрубка  $d_{пит} = 0,28 \cdot 76 = 21,3 \text{ мм}$ . Скорость во входном патрубке:

$$u_{вх} = \frac{4 \cdot 80}{60 \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot 0,0213^2} = 3,74 \text{ м/с.}$$

Критерий Рейнольдса во входном патрубке:

$$Re_{вх} = \frac{3,74 \cdot 0,0213 \cdot 1000}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 53200.$$

По рисунку 4.8 находим  $A = 1,5$ . При  $Q_{оч}/Q_{вх} = 0,9$  критерий Эйлера по формуле (4.19) равен:

$$Eu = 1 + 3,5 \cdot 1,5 \cdot 0,9^{0,8} = 5,82.$$

Соппротивление гидроциклона без воздушного столба равно:

$$\Delta p = 5,82 \cdot 1000 \cdot 3,74^2 = 81500 \text{ Н/м}^2 \text{ или } 0,83 \text{ ат.}$$

Минимальный диаметр улавливаемых частиц из формулы (4.21) равен:

$$d_{ч} = \sqrt{\frac{53200(1,5 \cdot 10^{-3})^2}{6,5(2800 - 1000)81500}} = 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ м или } 11,2 \text{ мкм.}$$

Такой же результат получаем по формуле (2.11):

$$d_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{3,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3^2}}{0,38 \left(\frac{2800 - 1000}{1000}\right) \left(\frac{81500 \cdot 60 \cdot 1000}{80}\right)}} = 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

**Пример расчета 2.** Какова будет эффективность очистки в том же гидроциклоне, что и в примере 1, при увеличении производительности до 100 л/мин?

**Решение.** Скорость во входном патрубке:

$$u_{\text{вх}} = \frac{4 \cdot 100}{60 \cdot 1000 \cdot 3,14 \cdot 0,0213^2} = 4,68 \text{ м/с.}$$

Критерий Рейнольдса во входном патрубке:

$$Re_{\text{вх}} = \frac{4,68 \cdot 0,0213 \cdot 1000}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 66500.$$

По рисунку 4.8 находим  $A = 1,67$ . При  $Q_{\text{оч}}/Q_{\text{вх}} = 0,9$  критерий Эйлера по формуле (4.19) равен:

$$Eu = 1 + 3,5 \cdot 1,67 \cdot 0,9^{0,8} = 6,4.$$

Сопротивление гидроциклона без воздушного столба равно:

$$\Delta p = 6,4 \cdot 1000 \cdot 4,68^2 = 140000 \text{ Н/м}^2 \text{ или } 1,43 \text{ ат.}$$

Минимальный диаметр улавливаемых частиц по формуле (4.19) равен:

$$d_{\text{ч}} = \sqrt{\frac{66500(1,5 \cdot 10^{-3})^2}{6,5(2800 - 1000)140000}} = 9,6 \cdot 10^{-6} \text{ м или } 9,6 \text{ мкм.}$$

Эти примеры показывают, что увеличение эффективности очистки сопровождается ростом энергетических затрат на проталкивание массы через гидроциклон. Производительность гидроциклона при этом существенно возрастает.

**Пример расчета 3.** Спроектировать оптимальный гидроциклон для очистки бумажной массы при тех же условиях, что и в предыдущих примерах, но предусмотреть улавливание частиц диаметром 7,5 мкм. Максимально

располагаемые затраты давления на сопротивление  $\Delta p = 3,5$  ат. Отношение  $Q_{оч}/Q_{вх} = 0,9$ .

**Решение.** Если за расчетный диаметр принять  $d_q = 7,5$  мкм, заданное условие не будет выполнено, так как 50% частиц этого размера будут уходить с очищенной массой. Поэтому за расчетный диаметр частиц следует принять меньшую величину. Берем  $d_q = 7$  мкм.

По формуле (4.21) критерий Рейнольдса равен:

$$Re_{вх} = 6,5 \frac{(7 \cdot 10^{-6})^2 (2800 - 1000) 3,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{(1,5 \cdot 10^{-3})} = 87300.$$

По рисунку 4.8 величина  $A = 1,83$ . При  $\varepsilon = 1$  критерий Эйлера по формуле (4.19) равен:

$$Eu = 1 + 3,5 \cdot 1,83 \cdot 0,9^{0,8} = 6,9.$$

Скорость во входном патрубке по формуле (4.16) равна:

$$u_{вх} = \sqrt{\frac{3,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 6,9}} = 7,05 \text{ м/с.}$$

Диаметр входного патрубка по формуле (4.20) равен:

$$d_{пит} = \frac{87300 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{7,05 \cdot 1000} = 0,0186 \text{ м} = 18,6 \text{ мм.}$$

Диаметр гидроциклона  $D = 18,6/0,28 = 67$  мм.

Длина гидроциклона  $L = 5 \cdot 67 = 335$  мм.

Диаметр сливного патрубка  $d_{сл} = 0,34 \cdot 67 = 23$  мм.

Производительность  $Q_{вх} = (3,14/4) \cdot 0,0186^2 \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 7,05 = 115$  л/мин.

**Пример расчета 4.** Как изменятся размеры гидроциклона и его производительность, если требуется получить ту же эффективность, но при гидравлических сопротивлениях  $\Delta p = 2,5$  ат.

**Решение.** Число  $Re_{вх} = (2,5/3,5)87300 = 62500$ . Величина  $A = 1,62$ . При  $\varepsilon = 1$  критерий Эйлера  $Eu = 1 + 3,5 \cdot 1,62 \cdot 0,9^{0,8} = 6,22$ .

Скорость во входном патрубке по формуле (4.16) равна:

$$u_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 6,22}} = 6,28 \text{ м/с.}$$

Диаметр входного патрубка по формуле (4.20) равен:

$$d_{\text{пит}} = \frac{62500 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{6,28 \cdot 1000} = 0,0149 \text{ м} = 14,9 \text{ мм.}$$

Диаметр гидроциклона  $D = 14,9/0,28 = 53 \text{ мм.}$

Длина гидроциклона  $L = 5 \cdot 53 = 265 \text{ мм.}$

Диаметр сливного патрубка  $d_{\text{сл}} = 0,34 \cdot 53 = 18,1 \text{ мм.}$

Производительность  $Q_{\text{вх}} = (3,14/4) \cdot 0,0149^2 \cdot 60 \cdot 1000 \cdot 6,28 = 65,5 \text{ л/мин.}$

### 4.3 Алгоритм расчета эффективности турбулентной сепарации

Расчет эффективности турбулентной сепарации начинается с гидравлического расчета гидроциклона, а именно определяется перепад давления. Затем необходимо рассчитать следующие параметры: динамическую скорость трения на стенке  $u_*$ , м/с;  $R_\infty$ ; коэффициент переноса дисперсной фазы  $\beta_D$ , м/с; число единиц переноса  $N$  и эффективность турбулентной сепарации  $\eta$ .

Динамическая скорость рассчитывается по формуле (2.22), предварительно необходимо рассчитать диссипацию энергии по формуле (2.23).

После оценки размеров частиц, вычисляется коэффициент переноса дисперсной фазы по соответствующим формулам (2.29) или (2.30).

Далее рассчитывается число единиц переноса, отнесенных к концентрациям потока,  $N$  (2.17) и эффективность турбулентной сепарации  $\eta$  (2.16). Алгоритм расчета турбулентной эффективности приведен дальше.

**Пример расчета.** В гидроциклоне (диаметр 75 мм, высота 545 мм, диаметр нижнего слива 26 мм, диаметр верхнего слива 20 мм, радиус воздушного столба 2 мм) очищается целлюлозная масса плотностью  $\rho_{\text{жс}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ , вязкостью  $\mu_{\text{жс}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 2500 \text{ кг/м}^3$ . Производительность верхнего слива  $Q_{\text{в.сл.}} = 0,224 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , производительность нижнего слива  $Q_{\text{н.сл.}} = 1,462 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Определить минимальный диаметр улавливаемых частиц, диаметр частиц, увлекаемых турбулентными пульсациями, и эффективность турбулентной сепарации. Стенки гидроциклона гладкие.

**Решение.** Производительность гидроциклона складывается из объемных расходов жидкости через нижний и верхний сливы:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{в.сл}} + Q_{\text{н.сл}} = (0,224 + 1,462) \cdot 10^{-3} = 1,686 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Диаметр входного патрубка можно найти из соотношений параметров гидроциклона [14]:

$$d_{\text{вх}} = (1 \dots 2)d_{\text{в.сл}} = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ м}.$$

Скорость среды во входном патрубке находится по формуле:

$$u_{\text{вх}} = \frac{4Q_{\text{вх}}}{\pi d_{\text{вх}}^2} = \frac{4(1,686 \cdot 10^{-3})}{3,14 \cdot 0,04^2} = 1,342 \text{ м/с}.$$

Задавшись отношением  $Q_{\text{оч}}/Q_{\text{вх}} = 0,9$ , критерий Эйлера вычисляем по (4.19):

$$Eu = 1 + 3,5A \left( \frac{Q_1}{Q} \right)^{0,8} \quad \varepsilon = 1 + 3,5 \cdot 1,2 \cdot 0,9^{0,8} \cdot 1 = 4,86,$$

где  $\varepsilon = 1$  для гладких стенок гидроциклона.

Величина  $A$  определена по графику 4.2,  $A=1,2$ , при  $Re_{\text{вх}} = 35786$ :

$$Re_{\text{вх}} = \frac{d_{\text{вх}} u_{\text{вх}} \rho_{\text{ж}}}{\mu} = \frac{0,04 \cdot 1,342 \cdot 1000}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 35786.$$

Гидравлическое сопротивление гидроциклона (4.17):

$$\Delta p = 0,5 Eu \rho_{\text{ж}} u_{\text{вх}}^2 = 0,5 \cdot 4,86 \cdot 1000 \cdot 1,342^2 = 4376,343 \text{ Н/м}^2.$$

Площадь входного патрубка:  $S = \pi d_{\text{вх}}^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,04^2 / 4 = 0,00126 \text{ м}^2$ .

Диссипация энергии (2.23):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta p S u_{\text{вх}}}{V_{\text{ж}}} = \frac{4376,343 \cdot 0,00126 \cdot 1,342}{1,197 \cdot 10^{-3}} = 6182,16 \text{ Вт/м}^3,$$

где  $V_{\text{ж}} = 1,197 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  – объем жидкости в гидроциклоне. Динамическая скорость связана со средней диссипацией энергии следующей формулой (2.22):

$$u_* = \left( \frac{11,6 \chi \bar{\varepsilon} \nu}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,25} = \left( \frac{11,6 \cdot 0,4 \cdot 6182,16 \cdot 10^{-6}}{1000} \right)^{0,25} = 0,0732 \text{ м/с}.$$

Минимальный диаметр улавливаемых частиц определяем по формуле (2.11):

$$d_u = \sqrt{\frac{K\mu_{жс}}{L \left( \frac{\rho_{ч} - \rho_{жс}}{\rho_{жс}} \right) \frac{\Delta p}{Q_{ВХ}}}} = \sqrt{\frac{3,5 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{0,545 \left( \frac{2500 - 1000}{1000} \right) \frac{4376,343}{1,686 \cdot 10^{-3}}}} =$$

$$= 4,974 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

Оценка размеров частиц по выражению (2.19):

$$0,134 \sqrt{\frac{R\mu_{жс}}{\rho_{ч}u_*}} = 0,134 \sqrt{\frac{0,0375 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{2500 \cdot 0,0732}} = 7,43 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

т.е. частицы в гидроциклоне с размерами  $d_u < 7,43 \cdot 10^{-5}$  м будут полностью увлекаться турбулентными пульсациями среды.

Безразмерная координата:

$$R_\infty = \frac{u_* R}{\nu} = \frac{0,0732 \cdot 0,0375}{10^{-6}} = 2745,$$

Коэффициент переноса дисперсной фазы (2.29):

$$\beta_D = \frac{0,0112V_t u_*}{R_1 0,0112\bar{V}_t + u_* \ln(R_\infty/R_1)} = \frac{0,0112 \cdot 1 \cdot 0,0732}{11,6 \cdot 0,0112 \cdot 1 + 0,0732 \ln\left(\frac{2745}{11,6}\right)} = 0,00155,$$

где  $\bar{V}_t = 1$  м/с [1];  $F = 0,089976$  м<sup>2</sup> – площадь поверхности гидроциклона. Число единиц переноса, отнесенных к концентрациям потока (2.17):

$$N = \frac{\beta_D F}{Q_{ВХ}} = \frac{0,00155 \cdot 0,089976}{1,686 \cdot 10^{-3}} = 0,083;$$

$$\eta = 1 - EXP(-N) = 1 - EXP(-0,083) = 0,0796.$$

Эффективность гидроциклона по экспериментальным данным для частиц, полностью увлекаемых турбулентными пульсациями среды, составит 7,96 %.

Для сравнения рассчитаем  $\bar{V}_t$  по (2.31):

$$\bar{U}_\infty = \bar{V}_t = 6,23u_*^{1,11} \left(\frac{R}{\nu}\right)^{0,111} = 6,23 \cdot 0,0732^{1,11} \left(\frac{0,0375}{10^{-6}}\right)^{0,111} = 1,08 \text{ м/с};$$

$$R_{\infty} = \frac{u_* R}{\nu} = \frac{0,0732 \cdot 0,0375}{10^{-6}} = 2745;$$

Далее расчет ведется аналогичным образом по формулам (2.28), (2.17) и (2.16):

$$\beta_D = \frac{0,0112 V_t u_*}{R_1 0,0112 \bar{V}_t + u_* \ln(R_{\infty}/R_1)} = \frac{0,0112 \cdot 1,08 \cdot 0,0732}{11,6 \cdot 0,0112 \cdot 1,08 + 0,0732 \ln\left(\frac{2745}{11,6}\right)} = 0,00164;$$

$$N = \frac{\beta_D F}{Q} = \frac{0,00164 \cdot 0,089976}{1,686 \cdot 10^{-3}} = 0,088;$$

$$\eta = 1 - EXP(-N) = 1 - EXP(-0,088) = 0,0838.$$

Эффективность гидроциклона по расчетным данным для частиц, полностью увлекаемых турбулентными пульсациями среды, составит 8,38%.

На основе этого расчета видно, что эффективности гидроциклона по экспериментальным и расчетным данным отличаются друг от друга не более, чем на 5 % относительных.

На основе приведенного расчета можно сделать вывод о адекватности математической модели эффективности турбулентной сепарации в гидроциклоне.

Таблица 4.1 – Исходные расчетные данные [34]

Наименование	Размерность	Обозначение	Величина
Диаметр корпуса гидроциклона	м	$D$	0,036
Радиус корпуса гидроциклона	м	$R$	0,018
Диаметр сливного патрубка	м	$d_{сл}$	0,008
Диаметр входного патрубка	м	$d_{вх}$	0,006
Диаметр шламового патрубка	м	$d_{шл}$	0,004
Радиус шламового патрубка	м	$r$	0,002
Высота цилиндрической части	м	$H_{ц}$	0,036
Высота конической части	м	$H_{к}$	0,2036
Давление на входе	МПа	$P_{вх}$	0,35
Плотность дисперсной фазы (песок)	кг/м <sup>3</sup>	$\rho_T$	2800
Динамическая вязкость сплошной фазы (нефть)	Па·с	$\mu$	$15,9 \cdot 10^{-3}$
Кинематическая вязкость сплошной фазы (нефть)	м <sup>2</sup> /с	$\nu$	$18,1 \cdot 10^{-6}$
Плотность сплошной фазы (нефть)	кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	879

Площадь внутренней поверхности:

$$F = \pi D H_{\text{ц}} + \pi(R + r)l = \pi D H_{\text{ц}} + \pi(R + r)\sqrt{H_{\text{к}}^2 + (R - r)^2} = 16,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Объем жидкости в гидроциклоне:

$$V_{\text{ж}} = \pi R^2 H_{\text{ц}} + \frac{1}{3} \pi H_{\text{к}} (R^2 + Rr + r^2) = 0,113 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Производительность гидроциклона:

$$K_D = \frac{0,08D + 2}{0,1D + 1} = \frac{0,08 \cdot 3,6 + 2}{0,1 \cdot 3,6 + 1} = 1,68;$$

$$K_{\alpha} = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \text{tg} \frac{\alpha}{2}} = 0,79 + \frac{0,044}{0,0379 + \frac{H_{\text{к}}}{(R - r)}} = 0,79 +$$

$$+ \frac{0,044}{0,0379 + \frac{20,36}{(1,8 - 0,2)}} = 1,17;$$

$$Q = 15,5 K_D K_{\alpha} d_{\text{вх}} d_{\text{сл}} \sqrt{P_{\text{вх}}} = 15,5 \cdot 1,68 \cdot 1,17 \cdot 0,6 \cdot 0,8 \sqrt{3,5} = 27,34 \text{ л/мин} = 0,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Скорость во входном патрубке:

$$u_{\text{вх}} = \frac{4Q_{\text{вх}}}{\pi d_{\text{вх}}^2} = \frac{4(0,46 \cdot 10^{-3})}{3,14 \cdot 0,006^2} = 16,3 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса:

$$Re_{\text{вх}} = \frac{d_{\text{вх}} u_{\text{вх}} \rho}{\mu} = \frac{0,006 \cdot 16,3 \cdot 879}{15,9 \cdot 10^{-3}} = 35786 \rightarrow A = 0,5; \gamma = 18; n = 2; \varepsilon = 1.$$

Соотношение  $Q_1/Q$  можно принимать с большим округлением равным 0,9 [4,7], так же можно использовать соотношение геометрических размеров:

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{d_{\text{сл}}^2}{d_{\text{сл}}^2 + d_{\text{шл}}^2} = \frac{0,008^2}{0,008^2 + 0,004^2} = 0,64.$$

Критерий Эйлера вычисляем по формуле:

$$Eu = 1 + \varepsilon \gamma \left( \frac{d_{\text{вх}}}{d_{\text{сл}}} \right)^n \left( \frac{D_{\text{hc}}}{L} \right)^{0,7} \left( \frac{Q_1}{Q} \right)^{0,8} A = 1 + 1 \cdot 18 \left( \frac{0,006}{0,008} \right)^2 \left( \frac{0,036}{0,0396} \right)^{0,7} \cdot (0,64)^{0,8} \cdot 0,5 = 1,12.$$

Критерий эффективности гидроциклона:

$$K = \gamma \left( \frac{d_{\text{вх}}}{d_{\text{сл}}} \right)^n \left( \frac{D}{L} \right)^{0,7} = 18 \left( \frac{0,006}{0,008} \right)^2 \left( \frac{0,036}{0,0396} \right)^{0,7} = 0,334.$$



Гидравлическое сопротивление гидроциклона:

$$\Delta p = 0,5 E u_{\text{вх}}^2 = 0,5 \cdot 1,12 \cdot 879 \cdot 16,3^2 = 130783 \text{ Н/м}^2.$$

Площадь входного патрубка:

$$S = \frac{\pi d_{\text{вх}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,006^2}{4} = 0,00002826 \text{ м}^2.$$

Диссипация энергии:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta p S u_{\text{вх}}}{V_{\text{ж}}} = \frac{130783 \cdot 0,00002826 \cdot 16,3}{0,113 \cdot 10^{-3}} = 533130 \text{ Вт/м}^3.$$

Динамическая скорость:

$$u_* = \left( \frac{11,6 \chi \bar{\varepsilon} \nu}{\rho} \right)^{0,25} = \left( \frac{11,6 \cdot 0,4 \cdot 533130 \cdot 18,1 \cdot 10^{-6}}{879} \right)^{0,25} = 0,475 \text{ м/с.}$$

Минимальный диаметр улавливаемых частиц:

$$d_q = \sqrt{\frac{K \mu}{L \left( \frac{\rho_q - \rho}{\rho} \right) \frac{\Delta p}{Q}}} = \sqrt{\frac{0,334 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3}}{0,2396 \left( \frac{2800 - 879}{879} \right) \frac{130783}{0,46 \cdot 10^{-3}}}} = 5,9 \text{ мкм.}$$

Оценка размеров частиц:

$$0,134 \sqrt{\frac{R \mu}{\rho_q u_*}} = 0,134 \sqrt{\frac{0,018 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3}}{2800 \cdot 0,475}} = 62 \text{ мкм.}$$

т.е. частицы в гидроциклоне с размерами  $d_q < 62$  мкм будут полностью увлекаться турбулентными пульсациями среды.

Тангенциальная скорость:

$$\bar{U}_{\infty} = \bar{V}_t = 6,23 u_*^{1,11} \left( \frac{R}{\nu} \right)^{0,111} = 6,23 \cdot 0,475^{1,11} \left( \frac{0,018}{18,1 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,111} = 7,1 \text{ м/с.}$$

Безразмерная координата:

$$R_{\infty} = \frac{u_* R}{\nu} = \frac{0,475 \cdot 0,018}{18,1 \cdot 10^{-6}} = 472.$$

Коэффициент переноса дисперсной фазы:

$$\beta_D = \frac{0,0112 \bar{V}_t u_*}{R_1 0,0112 \bar{V}_t + u_* \ln(R_{\infty}/R_1)} = \frac{0,0112 \cdot 7,1 \cdot 0,475}{11,6 \cdot 0,0112 \cdot 7,1 + 0,475 \ln(472/11,6)} = 0,0148;$$

Число единиц переноса и эффективность разделения:

$$N = \frac{\beta_D F}{Q} = \frac{0,0148 \cdot 16,9 \cdot 10^{-3}}{0,46 \cdot 10^{-3}} = 0,544$$

$$\eta = 1 - EXP(-N) = 1 - EXP(-0,544) = 0,4195.$$

Эффективность гидроциклона по расчетным данным для частиц крупностью 5,9 (полностью увлекаемых турбулентными пульсациями среды) составит 41,95%.

По экспериментальным данным [34] частицы с диаметром 5,26 мкм удаляются с песками в количестве 42%. В результате следует практически полное согласование с опытными данными.

Следует отметить, что при осаждении частиц на стенки гидроциклона из потока имеет место такое явление, как отскок и сдувание твердых частиц со стенок турбулентным потоком. Такое явление является спутным при турбулентном осаждении частиц.

Мигрируя в сторону стенок или оседая, взвешенные частицы ударяются со стенками гидроциклона и отскакивают от них, не задерживаясь на поверхности стенок; либо частицы удерживаются стенками гидроциклона, и далее набегающий турбулентный поток сдувает такие частицы со стенок гидроциклона. Поэтому эффект очистки гидроциклона снижается.

Доля уловленных при соприкосновении со стенкой частиц характеризуется коэффициентом удержания частиц [33]. Этот коэффициент сильно зависит от диаметра осаждающихся частиц, скорости и направления потока среды, геометрии стенок (т.е. вертикальные стенки у вертикального гидроциклона и горизонтальные – у горизонтального гидроциклона). По данным [33] можно сделать следующие выводы об этих зависимостях:

1. в вертикальном гидроциклоне коэффициент удержания частиц понижается с ростом диаметра частиц, т.е. при постоянной скорости среды на стенках лучше осаждаются частицы малого диаметра;

2. в вертикальном гидроциклоне при увеличении скорости среды падает значение коэффициента удержания частиц одной фракции;

3. в горизонтальных гидроциклонах большое влияние на коэффициент удержания взвешенных частиц оказывает не только центробежная сила, но и сила тяжести; так на горизонтальных стенках намного лучше оседают частицы большего диаметра, т.е. коэффициент удержания частиц относительно большего диаметра выше, чем коэффициент удержания частиц малого диаметра.

Особенно при выборе и расчете гидроциклона важно обращать внимание на скорость среды в аппарате. Так при некоторых малых скоростях обеспечивается оптимальная (наилучшая) очистка среды от дисперсных частиц.

Недостаточная или слишком высокая скорость среды не обеспечивают качества очистки. При недостаточной скорости не будет происходить осаждения частиц на стенки гидроциклона, а при высокой скорости среды наоборот. С одной стороны, повышение скорости потока среда увеличивает осаждаемость частиц дисперсной среды на стенках гидроциклона, а с другой – способствует повышению сдувания уже осевших частиц со стенок.

### **Контрольные вопросы:**

1. В каких промышленных циклах работают гидроциклоны? Дайте объяснение каждому.
2. Какие геометрические соотношения у гидроциклона оптимальной конструкции?
3. К определению какого показателя сводится гидравлический расчет?
4. От каких величин зависит перепад давления в гидроциклоне?
5. Как меняется перепад давления в зависимости от воздушного столба?
6. По какой причине не выгодно сильно увеличивать производительность гидроциклона?
7. Как получена формула, по которой определяется коэффициент переноса дисперсной фазы?
8. Как перевести л/мин в м<sup>3</sup>/ч? м<sup>3</sup>/ч в м<sup>3</sup>/с?

## ГЛАВА 5

### ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОЦИКЛОНОВ

В первый раз гидроциклон был применен в промышленности на углеобогащательной фабрике Голландии в 1939 году. Серийное производство гидроциклонов в СССР начато в 1956 [5]. Такое широкое применение гидроциклоны приобрели из-за простоты конструкции и высокой эффективности работы.

Следует различать такие типы гидроциклонов, как гидроциклоны-классификаторы, гидроциклоны-сгустители и гидроциклоны-сепараторы. Гидроциклоны-классификаторы применяются для разделения зерен по крупности; гидроциклоны-сгустители – для отделения части воды от зерен; гидроциклоны-сепараторы – для обогащения полезных ископаемых в минеральных суспензиях. Эта разница обуславливает область применения гидроциклонов.

Гидроциклоны применяются в угольной и рудной промышленности в качестве обогатителей, классификаторов; в бумажно-целлюлозной промышленности для очистки массы; в стекольно-керамической промышленности для обогащения глин. Известны попытки использования гидроциклонов для улучшения качества рециркуляционного активного ила на установках биологической очистки сточных вод методом обезвоживания и классификации шлама по степени зольности и т.д. [3].

#### 5.1 Нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленности

В настоящее время гидроциклоны часто применяются в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Чаще всего гидроциклоны используют для механического разделения полидисперсных гетерогенных систем (нефтедержащие воды, например).

Другой технологией в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности является использование гидроциклона при стабилизации нефти [3]. В состав нефти входят низкокипящие углеводороды, содержание которых может быть очень большим (до 15%). В этом случае нефть необходимо стабилизировать, чтобы не снизился выход легких фракций при дальнейшей ее переработке.

Стабилизация нефти в зависимости от применения продуктов в процессе производится по двум вариантам [3]:

1. стабилизация с использованием газа в качестве топлива печей или подачей ее на газокomppressorную станцию;

2. стабилизация нефти с получением широкой фракции легких углеводородов.

Общеизвестно, что стабилизация нефти методом ректификации является энергоемким, металлоемким процессом, для проведения которого необходимы сложные расчеты.

При замене ректификационной колонны на гидроциклонную установку [3] резко снижаются энергетические и материальные затраты. Температура нефти перед подачей в гидроциклон не превышает 343К, в то время как температура нефти в зоне питания ректификационной колонны, обеспечивающая аналогичную эффективность стабилизации по показателю давления насыщенных паров, составляет 523-573 К. Давление нефти на входе в гидроциклон составляет 0,25-0,6 МПа. Работа гидроциклонной установки стабилизации при таких невысоких давлениях дает возможность при подключении непосредственно после блока обезвоживания-обессоливания исключить использование дополнительных печных насосов, характерных для установок с блоком ректификации.

В отличие от стабилизации нефти в ректификационной колонне, при которой значительная часть получаемого нестабильного бензина возвращается в колонну в качестве орошения, в случае обработки нефти в гидроциклоне весь отобраный в центробежном поле бензин идет потребителям, чем в значительной степени снижаются затраты, связанные с захолаживанием продуктов стабилизации.

## **5.2 Энергетическая и теплоэнергетическая промышленность**

Гидроциклоны могут использоваться для очистки и обработки воды на ТЭЦ, в котельных, тепловых сетях, а также для обработки сточных вод (таблица 5.1). Однако необходимо отметить, что применение гидроциклонов открытого типа на теплоэнергетических объектах малоперспективно: для этой области больше подходят напорные гидроциклоны закрытого типа. Другая специфическая особенность использования этих аппаратов в теплоэнергетике заключается в том, что высокая эффективность очистки достигается при многократном пропускании обрабатываемой воды через гидроциклон. Такая схема хорошо реализуется в условиях постоянной рециркуляции горячей воды в замкнутом контуре.

Таблица 5.1 – Технологические показатели работы напорных гидроциклонов различных конструкций на природных водах [14].

Тип гидроциклонов и место проведения исследований	Диаметр, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Давление на входе, МПа	Крупность улавливаемой взвеси средняя, мкм	Содержание взвеси, мг/л		Эффект осветления, %
					6	7	
1	2	3	4	5	6	7	8
Конический напорный гидроциклон, река Кура	75	2,3	0,1	10-20	864	562	25
		4,25	0,15		1060	540	49
			0,2		1096	496	55
			0,25		1221	488	60
Напорные конструкции, река Кура	50	5,83	0,05-0,2	12,3	1000	350	65
	100	12		21	1000	480	52
	150	35,7		21,4	4000	1600	51
	150	35,7		22,6	1000	520	48
	200	52,3		32,2	4000	2120	47
	300	129		29,1	1000	620	38
				29,9	4000	2480	38
				41,1	1000	720	28
		42,1	4000	2920	27		
Напорные конструкции, река Иня, г.Новосибирск	3,5	50	0,2	10,5	1750	525	69
				10,8	1170	440	62
				10,5	575	220	60
				10	260	102	57
Двухкамерный напорный КазНИИВХ, оросительная вода Джамбульская область	200	98	0,2	100-50	7000	220	97
		120	0,3	песок	7000	310	96

По результатам таблицы 5.2 можно сделать вывод о том, что эффективность очистки воды с помощью гидроциклона значительно возрастает в комбинации с химическими реагентами, способствующими переводу примесей в нерастворимое состояние.

Таблица 5.2 – Степень эффективности различных способов очистки воды

Аппараты для очистки воды	Степень удаления, %	
	нефтепродукты	минеральные примеси
1	2	3
Гидроциклон	–	20–30
Гидроциклон+ реагенты	50–95	50–95
Отстойник	30–60	30–60
Отстойник + реагенты	50–95	50–95
Флотатор	30–60	–
Флотатор + реагенты	50–95	50–95
Осветлительный фильтр	100	100
Сорбционный фильтр	100	100

Если гидроциклоны традиционно довольно широко применяют на горнообогатительных предприятиях, то для водоподготовки – неоправданно мало. Среди большого числа фирм и организаций, занимающихся проектированием, монтажом и сервисным обслуживанием систем водоподготовки, лишь единицы используют в своей работе аппараты гидроциклонного типа.

Стоит отметить способы удаления механических примесей из воды путем совместного применения гидроциклонов с другими видами обработки. Так, достаточно продуктивно гидроциклоны используют в комбинации с магнитными способами обработки воды. Под действием магнитного поля в воде происходит образование осадка, который удаляется с помощью гидроциклонов. Такой способ обычно реализуется при обработке циркуляционной воды в системах теплоснабжения.

Другой пример комбинированного использования гидроциклонов – совмещение процессов удаления механических примесей на гидроциклонном аппарате и фильтрации на складчатом мембранном фильтре картриджного типа. При таком сочетании основная доля механических примесей удаляется гидроциклоном, а окончательная (тонкая) доочистка происходит на фильтрационном аппарате. Такое сочетание двух приемов удаления механических примесей позволяет не только повысить степень очистки воды, но и значительно продлить срок службы картриджного фильтра [16].

#### Контрольные вопросы:

1. Когда и где в первый раз были применены гидроциклоны?
2. В каких промышленности применяются гидроциклоны?

3. Как гидроциклоны используются в нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности?
4. В чем заключается недостаток ректификационной колонны перед гидроциклоном?
5. Возможно ли применение гидроциклонов в энергетической отрасли?
6. Предложите свой вариант использования гидроциклонов.



## Используемые источники:

1. Адельшин А.Б. Энергия потока в процессах интенсификации очистки нефтесодержащих сточных вод. Часть 1. Гидроциклоны. Казань: КГАСА, 1996, 200 с.
2. Алексеев Д.В., Николаев Н.А., Лаптев А.Г. Комплексная очистка стоков промышленных предприятий методом струйной флотации. – Казань: КГТУ. 2005. – 156 с.
3. Ахсанов Р.Р., Данилов В.И., Нурмухаметов Н.Х. Стабилизация нефти с помощью гидроциклона. – Уфа: Изд. фонда содействия развитию научных исследований, 1996. – 118 с.
4. Болдырев Ю.Н., Зорин А.А., Попов В.В. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов целлюлозно-бумажного, лесохимического и гидролизного производств. «Лесная промышленность», 1973, 280.
5. Большая Советская Энциклопедия (в 30 томах). Т.6 Гл. ред. А.М.Прохоров. Изд. 3-е. М., «Советская Энциклопедия», 1971.
6. Брайнес Я.М. Процессы и аппараты химических производств. М., Госхимиздат, 1947
7. Бушмелев В.А., Вольман Н.С. Процессы и аппараты целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесная промышленность, 1969.
8. Воронов Ю.В., Алексеев Е.В., Саломеев В.П., Пугачев Е.А. Водоотведение: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2007 – 415с.
9. Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р. Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). Учебное пособие. /Под ред. доктора технических наук, профессора, академика МАНЭБ и АТП РФ А.Г.Ветошкина – Пенза: Изд-во Пенз. технол. ин-та, 2004. - с.: ил., библиогр.
10. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты гидросферы. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. - с.: ил., библиогр.
11. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. - с.: ил., библиогр.
12. Гунич С.В., Янчуковская Е.В. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ химико-технологических процессов. Примеры и задачи. Часть I: учеб. пособие. — Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2010. — 216 с.
13. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн.: Часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995. – 400 с.: ил.
14. Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание второе, переработанное и дополненное. Учебное пособие. - М.: Издательство АСВ, 2004. - 496 с.

15. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. М.: «Экопресс-ЗМ», 1998, 505 с.
16. Иванов М. Гидроциклоны в водоподготовке; электронная версия статьи по адресу: [http://www.aqua-therm.ru/articles/articles\\_36.html](http://www.aqua-therm.ru/articles/articles_36.html)
17. «Инструкция по эксплуатации очистных сооружений нефтебаз, наливных пунктов, перекачивающих и автозаправочных станций», утвержденной Роскомнефтепродуктом РСФСР 31 марта 1988 г.
18. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., «Химия», 1973
19. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность многокомпонентных сред. М.: МАИК "Наука", 1998, 336 с: ил.
20. Копылов В.А. Очистка сточных вод напорной флотацией. М.: "Лесная промышленность", 1978. 96с.
21. Кузубова Л.И., Морозов С.В. Очистка нефтесодержащих сточных вод: Аналит. обзор / СО РАН, ГПНТБ, НИОХ. – Новосибирск, 1992. – 72 с.
22. Курочицкий Ч.К., Шипунова Н.С. Гидроциклоны в крахмольно-паточной промышленности. М.: «Пищевая промышленность», 1961, 85с.
23. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007, 500 с.
24. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахова А.И. Эффективность турбулентной сепарации мелкодисперсной фазы в тонкослойных отстойниках // Энергосбережение и водоподготовка , №5 (73), 2011. –С. 43-46.
25. Лаптев А.Г. , Башаров М.М., Фарахова А.И. Явления турбулентного переноса тонкодисперсных частиц в жидкой фазе динамических сепараторов // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2011. - №68 (04).–С. 1-31. <http://www.ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/43.pdf>.
26. А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. – М.: «Теплотехник», 2011. – 288 с.
27. Лебедьков А.Е., Кан А.В., Андреев А.Е., Лушников Л.В. Справочник инженера по подготовке нефти. Нефтеюганск, 2007, 295 с.
28. Матов Б.М. Флотация в пищевой промышленности. - М., Пищевая промышленность, 1976. 167с.
29. Мацнев А.И. Очистка сточных вод флотацией. - Киев, Будівельник, 1976, 132с.
30. Мацнев А.И. Применение флотации для очистки сточных вод. - Киев, 1965, 90с.
31. Мещеряков Н.Ф. Флотационные машины. - М.: изд-во "Недра", 1972, 250с.

32. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т. IV-12 / М. Б. Генералов, В. П. Александров, В. В. Алексеев и др.; Под общ. ред. М. Б. Генералова – М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.
33. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980, 176 с.
34. Мустафаев А.М., Гутман Б.М. Гидроциклоны в нефтедобывающей промышленности. М., Недра, 1981, 260 с.
35. Новиков А.В. Улучшение качества природных и очистка сточных вод [Текст]: учебное пособие / А.В. Новиков, Ю.Н. Женихов. Ч. 1. 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2006. 112 с. (достоинства и недостатки)
36. Очистка производственных сточных вод / Под ред. С.В. Яковлева, Я.А. Карелина, Ю.М. Ласкова, Ю.В. Воронова. - М.: Стройиздат, 1979. 320с.
37. Плановский А.Н., Рамм В.Н., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. –М.: Химия, 1968. – 848 с.
38. Проскураков В.А., Шмидт Л.И. Очистка сточных вод в химической промышленности Л., Химия, 1977. 520с.
39. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М., «Недра», 1978, 232 с.
40. Скобло А.И., Молоканов Ю.К., Владимиров А.И. Щелкунов В.А. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 677 с: ил.
41. Стахов Е.А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий хранения и транспорта нефтепродуктов. – Л.: Недра, 1983. – 263 с.
42. Шестов Р.Н. Гидроциклоны. – Ленинград: Издательство «Машиностроение», 1967. – 78 с.

## Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1. Основные методы очистки жидкостей от дисперсной фазы.....</b>	<b>5</b>
1.1 Классификация неоднородных систем.....	5
1.2 Отстаивание.....	6
1.3 Фильтрация.....	10
1.4 Центрифугирование.....	13
1.5 Флотация.....	15
<b>Глава 2. Принцип работы гидроциклонов.....</b>	<b>19</b>
2.1 Движение твердых частиц в гидроциклоне.....	19
2.2 Изменение плотности суспензии по объему гидроциклона.....	24
2.3 Движение жидкости в гидроциклоне .....	27
2.4 Эффективность турбулентной сепарации.....	30
<b>Глава 3. Конструкции гидроциклонов.....</b>	<b>34</b>
3.1 Общий вид гидроциклона.....	34
3.2 Конструктивное отличие гидроциклонов от циклонов, центрифуг и сепараторов.....	36
3.3 Классификация гидроциклонов по конструктивным особенностям.....	37
3.3.1 Конические гидроциклоны.....	38
3.3.2 Батарейные гидроциклоны и мультигидроциклоны.....	41
3.3.3 Трехпродуктовые гидроциклоны.....	43
3.3.4. Цилиндрические гидроциклоны.....	44
3.3.5. Винтовые гидроциклоны.....	45
3.3.6 Турбогидроциклоны.....	46
3.4 Маркировка гидроциклонов.....	48
<b>Глава 4. Расчет гидроциклонов.....</b>	<b>54</b>
4.1 Математическое моделирование гидроциклонов.....	54
4.1.1 Гидроциклон в открытом цикле измельчения.....	55
4.1.2 Гидроциклон в закрытом цикле измельчения.....	63
4.2 Гидравлический расчет.....	70
4.3 Алгоритм расчета эффективности турбулентной сепарации.....	76
<b>Глава 5. Область применения гидроциклонов.....</b>	<b>84</b>
5.1 Нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленности.....	84
5.2 Энергетическая и теплоэнергетическая промышленность.....	85
Используемые источники.....	89

Марат Миннахматович Башаров

Ольга Александровна Сергеева

## УСТРОЙСТВО И РАСЧЕТ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Учебное пособие

Под редакцией А.Г. Лаптева

Компьютерный набор: О.А. Сергеева

Подписано в печать 08.06.2012г. Формат 60x84 1/16 .

Бумага офсетная. Вид печати ром. Усл. печ. л. 5,8.

Уч. - изд. Тираж 500 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета.

Издательство ООО «Вестфалика» (ИП Колесов В.П.)