

Параметрический анализ центробежных аппаратов для разделения газожидкостных смесей и подготовки газа.

В настоящее время на рынке предлагается целая гамма центробежных аппаратов (преимущественно циклонов) для осаждения нежелательных примесей из потока газа, которые, по заверению производителей имеют «высокую эффективность очистки (степень сепарации – 99,99% при любом давлении и производительности)». Достоверность подобных деклараций вызывает вполне обоснованные сомнения.

В данном обзоре приводятся анализ и расчетные оценки эффективности центробежных аппаратов, исходя из их конструктивных особенностей.

На этой основе даются рекомендации относительно возможностей их применения в технологии подготовки газа. Приводятся результаты промышленных испытаний центробежных аппаратов.

1. Основные положения.

1.1. Условие разделения. Расчет диаметра осаждаемой частицы.

Принцип разделения газожидкостных систем за счет разности плотности фаз находит широкое практическое применение и реализуется в гравитационных сепараторах (отстойниках), а также в центробежных аппаратах, к числу которых помимо циклонов относятся и устройства с вращающимся ротором (роторные сепараторы и центрифуги).

Все эти аппараты, имея существенные конструктивные отличия, с точки зрения теории разделения подчиняются одним и тем же закономерностям и имеют одно назначение – осадить из потока газа дисперсную фазу (капельную жидкость и мех.примеси).

Результатом процесса осаждения является достижение такого положения, когда движение частицы дисперсной фазы в направлении к выходному отверстию аппарата прекратится и она осядет на некоторую поверхность (поверхность осаждения) или попадет в некую застойную зону, откуда ее дальнейшее перемещение в указанном направлении станет невозможным.

Из отмеченного выше можно вывести условие разделения, а именно: время нахождения частицы в аппарате должно быть больше, чем время необходимое для достижения ей поверхности осаждения:

$$t_{oc} \leq t_n, \text{ где:} \quad (1)$$

t_{oc} – время, которое необходимо для достижения частицы поверхности осаждения;

t_n – время пребывания частицы внутри аппарата.

Исходя из выражения (1), следует очевидный вывод: чем меньше время t_{oc} и чем больше продолжительность t_n , тем лучше эффективность разделения, достигаемая в аппарате.

Рассмотрим, как протекает процесс осаждения на примере горизонтального гравитационного сепаратора (рис.1), как наиболее простого из всех перечисленных выше устройств.

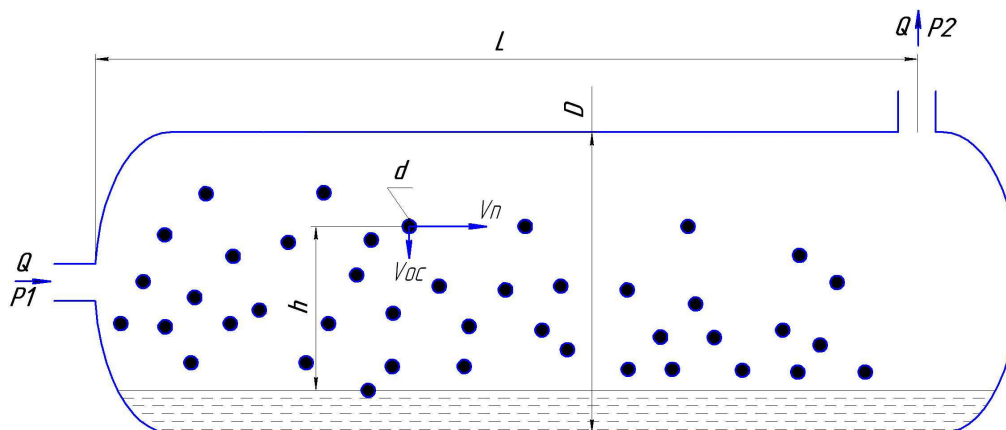


Рис. 1. Осаждение в гравитационном сепараторе.

Попадая с потоком газа в аппарат, частица диаметром d движется одновременно со скоростью потока V_n в направлении к выходному отверстию и под действием силы гравитации перемещается вниз со скоростью V_{oc} , пока не выпадет в осадок, достигнув поверхность осаждения.

Среднее время пребывания частицы в аппарате составит:

$$t_n = \frac{L}{V_n} \quad , \text{ где:} \quad (2)$$

L – длина пути частицы в аппарате по направлению к выходному отверстию;
 V_n – средняя скорость потока в данном направлении.

Приближенное выражение для расчета V_n можно записать как:

$$V_n = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad , \text{ где:} \quad (3)$$

Q – расход газа при рабочем давлении;
 D – диаметр аппарата.

С учетом выражений (2) и (3) получаем:

$$t_n = \frac{\pi D^2 L}{4Q} \quad (4)$$

Учитывая, что:

$$\frac{\pi D^2 L}{4} = V_{an} \quad , \text{ где:}$$

V_{an} – объем той части аппарата, в котором протекает процесс разделения (рабочий объем).

Выражение (4) может быть представлено в виде:

$$t_n = \frac{V_{an}}{Q} \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что с увеличением рабочего объема аппарата (при прочих равных условиях) время пребывания t_n пропорционально возрастает. Таким образом, чем больше рабочий объем аппарата, тем более благоприятны условия сепарации.

Время t_{oc} , необходимое для выпадения в осадок частицы, может быть представлено в виде:

$$t_{oc} = \frac{h}{V_{oc}}, \text{ где:} \quad (6)$$

h – путь, который необходимо преодолеть произвольной частице до поверхности осаждения;

V_{oc} – скорость осаждения частицы.

Выражение (6) для частицы, находящейся в самой отдаленной от поверхности осаждения точке, т.е. при $h = D$ будет выглядеть, как:

$$t_{oc} = \frac{D}{V_{oc}}, \text{ где:} \quad (7)$$

D – внутренний диаметр аппарата

Согласно закону Стокса скорость осаждения равна:

$$V_{oc} = \frac{d^2(\Delta\rho)g}{18\mu}, \text{ где:} \quad (8)$$

d – диаметр частицы;

$\Delta\rho$ – разница плотностей частицы и газа при рабочем давлении;

g – ускорение свободного падения;

μ – коэффициент динамической вязкости газа.

Прим. Согласно кинематической теории газа его вязкость практически не зависит от давления).

С учетом выражений (7) и (8) получаем:

$$t_{oc} = \frac{18\mu D}{d^2(\Delta\rho)g} \quad (9)$$

Исходя из условия (1), приравняв выражения (5) и (9), получим:

$$\frac{V_{an}}{Q} = \frac{18\mu D}{d^2(\Delta\rho)g} \quad (10)$$

Из последней формулы выведем выражение для расчета диаметра частиц, осаждаемых в сепараторе с вероятностью 100%:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu D Q}{(\Delta\rho)g V_{an}}} \quad (11)$$

Необходимо отметить, что данное выражение является приближенным, однако оно вполне пригодно для качественной оценки эффективности осаждения.

*Например, расчет, произведенный по формуле (11), дает значение диаметра частиц воды, полностью осаждаемых в сепараторе с «рабочим» объемом 4,2 м³, диаметром 1,8 м, расход газа 1,0 м³/сек, при вязкости 0,00011 Па·с, плотности 0,75 кг/м³ и рабочем давлении 1,0 МПа примерно **300 микрон**.*

Прим. Для расчета приняты данные газового сепаратора ГС-2-2000.

Приведенное выше выражение (11) может быть применено и для расчета газовых сепараторов с вертикальной ориентацией оси аппарата, в этом случае вместо значения диаметра D в формулу следует подставить значение протяженности пути h , который необходимо преодолеть произвольной частице до поверхности осаждения. Величина h зависит от конструктивных особенностей конкретного газового сепаратора.

1.2. Расчетная оценка эффективности осаждения в центробежных аппаратах.

1.2.1. Осаждение в центрифуге с вращающимся ротором.

Выведем расчетную зависимость для оценки эффективности осаждения в центробежных аппаратах. Расчетная схема представлена на рис. 2.

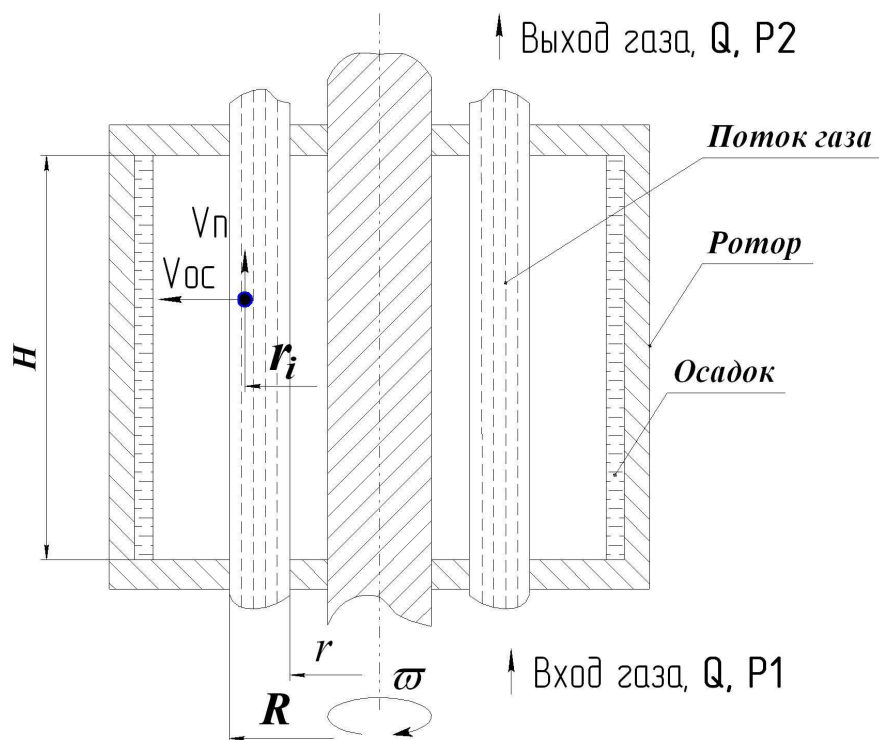


Рис. 2. Расчетная схема центробежного осаждения.

На рис. 2 представлена наиболее типичная и «правильная» схема организации потока газа внутри ротора. Такой схемой предусматривается кольцевой ввод потока в ротор и

кольцевой выход из ротора, соответственно. Периферия ротора находится в состоянии относительного покоя, т.е. заполнена застойной зоной, и в ней движение газа отсутствует.

Осаждаемая частица, находящаяся в потоке, вместе с потоком движется внутри ротора со скоростью V_n , и в то же время под действием центробежной силы устремляется к периферии со скоростью V_{oc} .

Также как и в гравитационном сепараторе, частица может считаться осажденной, если за время нахождения внутри ротора она достигнет застойной зоны.

Исходя из отмеченного выше, получим выражение для расчета рабочего объема $V_{an(u)}$ центробежного аппарата, т.е. того объема, в котором протекает процесс осаждения:

$$V_{an(u)} = \pi(R^2 - r^2)H, \text{ где:} \quad (12)$$

R – периферийный радиус потока;

r – внутренний радиус потока;

H – протяженность потока.

Для завершения осаждения частица должна преодолеть путь $h_{(u)}$, равный:

$$h_{(u)} = R - r \quad (13)$$

Отличительной особенностью центробежных аппаратов является то, что напряженность (ускорение) силового поля, в котором протекает осаждение, значительно превышает ускорение поля сил гравитации.

Ускорение ε_i центробежного поля для частицы, находящейся в точке с радиусом r_i , равно:

$$\varepsilon_i = \omega^2 r_i, \text{ где:} \quad (14)$$

ω - угловая скорость вращения потока.

Выведем выражения для расчетной оценки эффективности осаждения в центробежном поле, подставив в формулу (11) вместо D выражение (13), вместо V_{an} – (12), а вместо g – (14):

$$d = \sqrt{\frac{18\mu (R - r)Q}{(\Delta\rho) \pi(R^2 - r^2)H \omega^2 r_i}} = \quad (15)$$

$$\frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{18\mu Q}{(\Delta\rho) \pi(R + r)H r_i}} \quad (15a)$$

Используя формулу (15) выполним расчет эффективности осаждения в центрифуге ЦОГ 250, выпускаемой по ТУ 3617-001-78513999-2005, приняв для расчета те же технологические параметры по газу, которые были приняты для расчета гравитационного сепаратора в п.1.1. настоящего обзора. Конструктивные параметры

ЦОГ 250: $\omega=450 \text{ с}^{-1}$, $R=0,22 \text{ м}$, $r=0,15 \text{ м}$, принято $r_i=(R + r)/2 = 0,185 \text{ м}$.

*В результате расчета получено, ЦОГ осаждает 100 % частиц воды размером более **10 микрон**.*

Аналогичные результаты получены для всех моделей ЦОГ типоразмерного ряда по ТУ 3617-001-78513999-2005.

С практической точки зрения важно прояснить – является ли полученный на основе теоретических выкладок параметр эффективности (порядка 10 микрон) предельно возможным для центрифуг?

Для поиска ответа на данный вопрос подвергнем параметрическому анализу выражение (15).

Теоретически существуют следующие предпосылки для повышения эффективности осаждения:

- Увеличение угловой скорости вращения ротора;
- Расширение рабочего объема за счет увеличения радиуса R и протяженности H ;
- Сокращение пути, который необходимо преодолеть частице, для ее осаждения из потока .

Следует отметить, что возможности повышения угловой скорости вращения и рабочего объема ротора крайне ограничены из соображений надежности с одной стороны и нежелательности увеличения габаритов аппарата – с другой.

Наиболее реалистичным подходом, направленным на повышение эффективности центрифуги, является реализация конструктивных решений по сокращению пути осаждения частиц.

Пример такого решения представлен на рис. 3. Суть его состоит в том, что на пути внутрироторного потока размещают пористый элемент (вставку), выполненную из волокнистого материала, обладающего коалесцирующими свойствами.

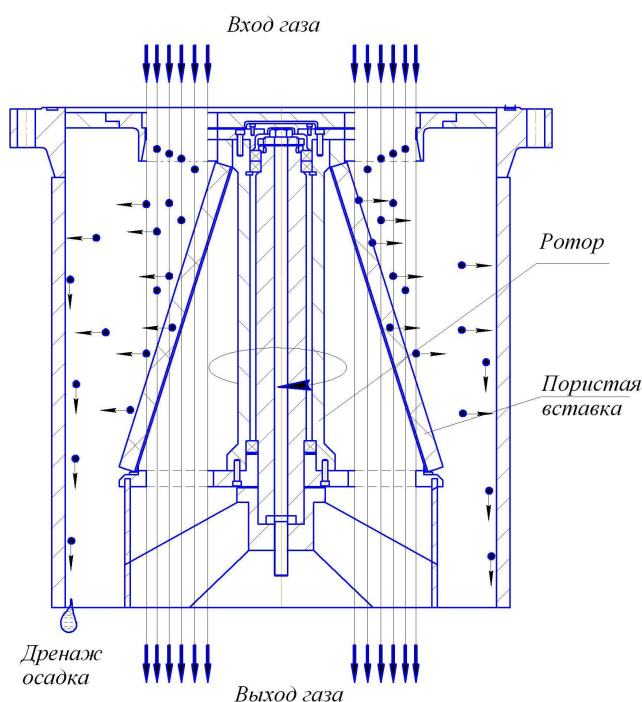


Рис.3. Центрифуга с пористой вставкой.

В этом случае осаждения частицы из потока будет происходить при ее контакте с материалом пористой вставки. Очевидно, что путь, который необходим частице для осаждения становится очень коротким.

Испытания образца центрифуги ЦОГ с пористой вставкой показали синергетический эффект в части качества осаждения. Полученные результаты позволяют рассматривать данный аппарат как полноценное устройство, способное обеспечить доведения качества подготовки газа до самых высоких кондиций.

1.2.2. Вихревые сепараторы (циклоны).

Принципиальное устройство вихревого сепаратора представлено на рис.4.

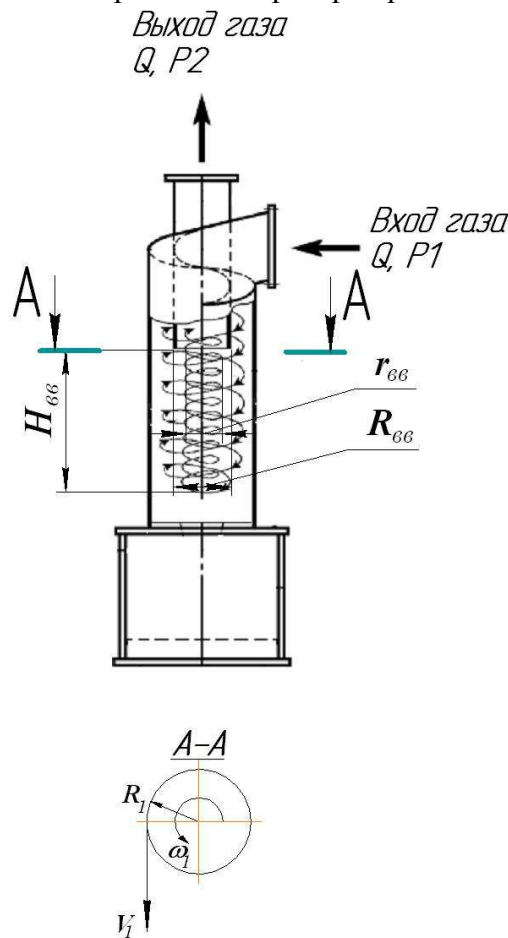


Рис. 4. Осаждение в вихревом сепараторе.

Газ поступает внутрь циклона через тангенциальный канал, который придает потоку закрутку (завихрение) относительно цилиндрической обечайки корпуса, как это указано на рис. 4. На первоначальном участке поток движется вниз, а затем меняет направление движения на противоположное, устремляясь к выходному центральному патрубку.

Таким образом, внутри циклона имеют место два вихря – нисходящий на периферии и восходящий в центральной зоне.

За счет вращения потока на частицы с более высокой плотностью действует центробежная сила, в результате чего они отбрасываются на обечайку аппарата, откуда под действием силы тяжести сползают вниз в сборную емкость.

Вполне очевидно, что имеющее место в циклоне интенсивное завихрение потока способствует диспергированию частиц жидкости, создавая условия для их измельчения в тонкую, парообразную пыль, ухудшая тем самым условия осаждения. Именно поэтому, вихревая техника, преимущественно применяется для осаждения твердых частиц, не подверженных диспергированию.

В силу сложности моделирования потока в вихревых аппаратах их инженерный расчет на предмет эффективности осаждения также представляет известную сложность. Это обусловлено неопределенностью в отношении угловой скорости вращения потока, а также в отношении того, какую часть объема аппарата можно считать рабочим объемом, в котором реализуется процесс осаждения.

Для оценочного расчета эффективности осаждения жидкости в циклоне примем, что при тангенциальной скорости V_1 потока на входе в аппарат с радиусом обечайки R_1 угловая скорость вращения ω_1 составит:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{R_1} \quad (16)$$

Понятно, что при контакте с неподвижной поверхностью поток замедляет вращение. С другой стороны при последующем перемещении в центральную зону аппарата угловая скорость увеличивается.

Примем, что первоначальное снижение угловой скорости в нисходящем вихре потока компенсируется ее последующим увеличением при переходе в восходящий вихрь.

Исходя из этого допущения, угловая скорость потока в восходящем вихре будет равна угловой скорости потока ω_1 на входе в аппарат (16). Протяженность восходящего вихря обозначим – $H_{\text{вв}}$.

Для дальнейших расчетов также примем, что лишь только те частицы могут считаться полностью осажденными в циклоне, если за счет действия центробежной силы они покинули восходящий вихрь и прекратили движение в направлении к выходу аппарата. Для соблюдения этого условия частица должна преодолеть расстояние h равное:

$$h = R_{\text{вв}} - r_{\text{вв}}, \text{ где:} \quad (17)$$

$R_{\text{вв}}$ – наружный радиус восходящего вихря;

$r_{\text{вв}}$ – внутренний радиус восходящего вихря;

С учетом принятых допущений зависимость (15) для расчета диаметра частиц, полностью осаждаемых в циклоне, будет иметь вид:

$$d = \frac{R_1}{V_1} \sqrt{\frac{18\mu Q}{(\Delta\rho) \pi (R_{\text{вв}} + r_{\text{вв}}) H_{\text{вв}} r_i}}, \text{ где:} \quad (18)$$

r_i – текущий радиус положения частицы, равный $(R_{\text{вв}} - r_{\text{вв}})/2$.

Для расчета эффективности осаждения частиц воды в циклоне взяты параметры сепаратора СЦВ, выпускаемых компанией «РосКом», а именно: $R_1=0,25$ м; $H_{\text{вв}}=0,8$ м; $R_{\text{вв}}=0,18$ м; $r_{\text{вв}}=0,1$ м; $V_1=20$ м/сек. Остальные параметры – те же, что и для расчета эффективности центрифуги, приведенном в предыдущем разделе.

В результате расчета получаем: $d \approx 90$ микрон.

2. Сравнение параметров аппаратов для осаждения жидкости из потока газа.

В таблице 1. для сравнения приведены основные конструктивные и расчетные параметры аппаратов, предназначенных для осаждения жидкости из потока газа, имеющих равное рабочее давление и пропускную способность.

Таблица 1.

Параметр	Тип аппарата		
	Отстойный сепаратор	Вихревой сепаратор	Центрифуга ЦОГ
Расход газа	Около 35 000 нм ³ /час		
Давление на входе	Около 1,0 МПа		
Высота аппарата	6200 мм	1400 мм (без конденсатосборника)	1800 мм (с конденсатосборником)
Диаметр аппарата	2000 мм	530 мм	800 мм.
Гидравлические потери	<0,0001 Р _{раб}	<0,001 Р _{раб}	<0,005 Р _{раб}
Расчетный диаметр частиц воды, полностью осаждаемых за один проход	≥300 микрон	≥90 микрон	≥10 микрон

Данные, представленные в таблице, дают возможность для сравнительного, качественного анализа параметров «реальных» аппаратов, предназначенных для осаждения дисперсной фазы из потока газа за счет разницы плотностей.

Подчеркнем особо еще раз: результаты расчета эффективности осаждения, представленные в таблице, могут быть приняты во внимание с учетом того обстоятельства, что они получены на основе чисто теоретических, с известным смысле «идеальных» представлений о процессе осаждения. Хотя справедливым будет полагать, что теоретические выкладки и данные, полученные на их основе, применительно к гравитационному сепаратору и центрифуге не очень существенно отличаются от реальности и потому пригодны для оперирования в инженерной практике.

Судить о мере соответствия реальности расчетных данных эффективности вихревого сепаратора, как устройства предназначенного для осаждения жидкой фазы, крайне затруднительно, поскольку наряду с процессом осаждения в данном аппарате имеет место процесс дробления относительно крупных частиц жидкости в мелкодисперсную пыль. На практике может иметь место такая ситуация, что на выходе их вихревого сепаратора нет частиц жидкости размером 50...100 микрон, поскольку, находясь в данном аппарате, они были диспергированы в более мелкую фракцию, но это вовсе не значит, что такие частицы отсутствовали на входе в аппарат. С этой точки зрения наиболее целесообразным представляется использование циклонов для осаждения твердых частиц, не подверженных размельчению.

Для оценки реальных возможностей вихревого сепаратора при его применении для осаждения твердых частиц на рис.4 представлен график, показывающий зависимость

фракционной полноты отсева от диаметра твердых частиц при их осаждении в типичном вихревом аппарате.

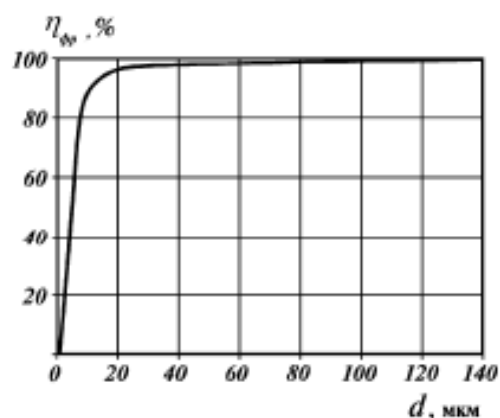


Рис.4. Эффективность осаждения твердых частиц в вихревом сепараторе.

Как видно из рисунка, 100-процентная полнота отсева в вихревом сепараторе достигается для твердых частиц размером более 100 микрон. В технической и справочной литературе приводится множество данных, подтверждающих эту цифру.

Попутно отметим, что результат расчета эффективности осаждения частиц песка с плотностью $2,6 \text{ кг/м}^3$ по формуле (18) дает значение диаметра частиц – около **60 микрон**.

3. Результаты экспериментальной проверки эффективности центробежных аппаратов.

В условиях промысла были проведены замеры содержания жидкости и анализы компонентного состава в пробах проб, отбиравшихся до и после испытываемого аппарата. Усредненные результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2.

№п/п	Аппарат	Место отбора проб	Содержание капельной жидкости, мг/м ³	Содержание фракции C_{5+} , г/м ³
1.	ЦОГ	Вход	5,3	33,4
		Выход	Отсутствие	22,3
2.	Вихревой сепаратор	Вход	8,7	47,5
		Выход	3,9	53,6

Как видно из представленной таблицы, центрифуга ЦОГ показывает высокую (практически 100-процентную) эффективность в части отделения капельной жидкости. Также отмечается существенное уменьшение концентрации тяжелых компонентов в пробе газа на выходе из аппарата.

Полнота осаждения капельной жидкости в вихревом сепараторе составляет примерно 70%, заметно уступая по этому параметру центрифуге.

Отмечено, что концентрация тяжелых компонентов на выходе вихревого сепаратора на выходе больше, чем на входе, что объясняется диспергированием жидких фракций за счет интенсивного завихрения потока внутри данного аппарата.

Выводы.

1. Декларируемые производителем вихревых сепараторов показатели эффективности осаждения жидкой фазы из потока газа не находят подтверждения по результатам расчетных оценок и экспериментальной проверки. При рассмотрении целесообразности применения вихревых сепараторов в технологии подготовки газа следует иметь в виду их ограниченные возможности по осаждению жидкой фазы.
2. Центрифуги с вращающимся ротором обеспечивают наилучшее осаждение тонкодисперсной жидкости из потока газа, что дает возможность их применения в качестве устройств концевой сепарации. Оснащение центрифуг пористой вставкой обеспечивает эффективное осаждения не только жидких, но и парообразных фракций с доведением качества газа до товарных кондиций.