

## РАЗДЕЛЕНИЕ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ В ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГАХ

С.А. Светлов, Ю.П. Волков

Исследован процесс разделения неоднородных жидких сред при изменении конструктивных параметров ротора центрифуги и технологических факторов центробежного разделения суспензий, содержащих тонкодисперсную твердую фазу. Рассмотрено осаждение твердой фазы в роторе центрифуги, проведена сравнительная оценка эффективности разработанных центрифуг с учетом полученных результатов исследования процессов разделения малоцентрированных суспензий продуктов переработки целлюлозы, изучено влияние технологических и конструктивных параметров ротора центрифуги на эффективность разделения суспензий.

Разделение малоцентрированных суспензий, содержащих высокодисперсную твердую фазу, требует создания высокоэффективного оборудования, обеспечивающего необходимое качество очистки технологических, промышленных и сточных вод. Решение данной проблемы возможно, если на стадиях очистки жидких сред использовать способы центробежного воздействия на разделяемую среду.

В настоящее время существует огромное количество различных конструкций центрифуг. Все они, в соответствии с классификацией [1], подразделяются по следующим признакам: по технологическому назначению, по способу проведения процесса (непрерывные или периодические), по основному конструктивному признаку, а так же по способу выгрузки осадка из ротора центрифуги.

По технологическому назначению различают следующие типы центрифуг: фильтрующие, осадительные, разделяющие (сепарирующие), комбинированные, в которых сочетаются два принципа разделения – осаждение с последующей фильтрацией или фильтрация с последующим осаждением дисперсной фазы в центробежном поле.

По основному конструктивному признаку центрифуги различаются горизонтальные, вертикальные, наклонные, с вертикальным валом, подвесные с верхним приводом, подвесные с нижним приводом (маятниковые), вертикальные трубчатые.

По способу выгрузки осадка центрифуги подразделяют на следующие типы: с ручной, шнековой, контейнерной, гравитационной

выгрузкой, с пульсирующим поршнем, с выталкивающим поршнем, с инерционной, ножевой, механико-пневматической и гидравлической выгрузкой осадка.

Главными факторами, определяющими выбор центрифуг и показатели их работы, являются физические свойства разделяемых сред, характерные для каждого отдельного технологического процесса. К этим факторам относятся:

- гранулометрический (дисперсный) состав твердой фазы;
- вязкость жидкой фазы;
- плотность твердой и жидкой фазы;
- концентрация суспензии;
- форма частиц.

К наиболее пригодным машинам для разделения малоцентрированных суспензий можно отнести роторные осадительные центрифуги, которые существенно интенсифицируют процесс, обеспечивая при этом низкое содержание высокодисперсной твердой фазы в фугате.

Осадительные центрифуги в основном предназначены для разделения плохо фильтрующихся суспензий, главным образом суспензий с нерастворимой твердой фазой с объемной концентрацией (5–30)% при дисперсности частиц не менее (5–40) мкм. Формирование в роторе слоя осадка может происходить двумя способами. По первому способу суспензия подводится в ротор до его заполнения. По окончании процесса осадительного центрифугирования и уплотнения осадка фугат отводится с помощью трубки, а затем осадок снимается ножом. По второму способу суспензия непрерывно подводится в ротор, а фугат

непрерывно переливается через борт. Твердая фаза накапливается на стенке ротора, и когда ротор заполняется осадком, подача суспензии прекращается, оставшаяся жидкость отводится черпающей трубкой, а осадок обычно срезается ножом. Фугат из ротора осадительной центрифуги по окончании стадии центробежного разделения при использовании ножевого съема осадка необходимо предварительно удалить, что вызывает дополнительные трудности при осуществлении процесса разделения.

Осадительная центрифуга, как и любая машина или аппарат, имеет техническую характеристику, по которой можно судить о возможности проведения в ней процесса разделения заданных сред при условии выполнения необходимых требований к получаемому продукту. В качестве такой характеристики используется комплекс величин, отражающих непосредственно конструктивные параметры ротора центрифуги, нерегулируемые во время его эксплуатации, и этот комплекс назван индексом производительности центрифуги. При расчете индекса производительности центрифуг, в наиболее общих случаях, используется следующая формула

$$Y = F \cdot Fr \quad , \quad (1)$$

где  $F$  – максимальное (реже среднее) значение поверхности осаждения,  $m^2$ ;  $Fr$  – модифицированный критерий Фруда или фактор разделения.

Фактор разделения находится из уравнения

$$Fr = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} \quad ,$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора, рад/с;  $r$  – внутренний радиус ротора, м;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/s^2$ .

Зная индекс производительности центрифуги, можно рассчитать теоретическую производительность центрифуги

$$Q = v \cdot x_0 \cdot Y \quad , \quad (2)$$

где  $v$  – коэффициент эффективности;  $x_0$  – скорость движения частицы дисперсной фазы под действием силы тяжести, м/с.

Обычно кинетические закономерности процесса осаждения тяжелой частицы в гравитационном поле считают справедливыми и при осаждении в поле действия центробежных сил [2, 3]. Однако некоторые авторы [4], считают, что процесс осаждения в центробежном поле имеет свои характерные особенности, что обусловлено следующими обстоятельствами.

При осаждении частицы в гравитационном поле предельная скорость осаждения этой частицы имеет постоянное значение, так как движущая сила (сила тяжести) постоянна. При осаждении частицы в центробежном поле движущая (центробежная) сила пропорциональна расстоянию частицы от оси вращения, поэтому предельная скорость имеет переменное значение. Вторым характерным отличием кинетики осаждения в центробежном поле является тот факт, что скорость частицы не может достигнуть предельного значения даже при бесконечном возрастании времени осаждения. Третье характерное отличие заключается в том, что на движение частицы влияет ускорение кориолисовой силы инерции.

В тоже время расчеты, выполненные многими авторами, например [2, 3], свидетельствуют о том, что применение законов осаждения частиц в поле сил тяжести для центробежного поля, с заменой величины ускорения свободного падения на центробежное ускорение, дают погрешность вполне приемлемую для практических расчетов.

Производительность центрифуги при разделении полидисперсных систем характеризуется уравнением, подобным уравнению для разделения монодисперсных суспензий [5]:

$$Q = v \cdot x_{0П} \cdot Y \quad , \quad (3)$$

где  $x_{0П}$  – скорость осаждения частицы, учитывающая полидисперсный состав твердой фазы в суспензии, м/с.

В этом случае индекс производительности рассматривают как произведение  $Fr^x \cdot F$ , причем показатель степени  $x$  определяется экспериментально.

Недостатком приведенных уравнений (1-3) является то, что они не учитывают характера потоков внутри ротора. Известно [6], что учет направления и скорости потоков

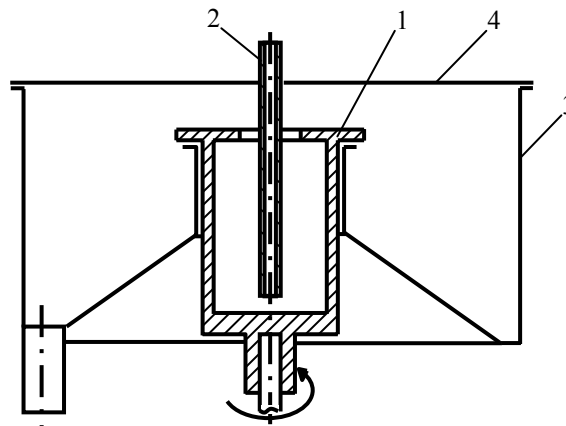
## РАЗДЕЛЕНИЕ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ В ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГАХ

жидкости может существенно повысить точность определения, например, величины относительного уноса дисперсной фазы в зависимости от конструктивных и технологических характеристик центрифуги, поскольку от характера течения жидкости в роторе напрямую зависит время пребывания дисперсной частицы в поле действия центробежных сил а, следовательно, производительность центрифуги и эффективность разделения суспензий. В тоже время характер внутриворотных потоков во многом определяется формой рабочих поверхностей ротора центрифуги [7-10].

Для определения конструктивных и технологических параметров роторной осадительной центрифуги и их влияния на качество разделения суспензий проведены исследования по разделению водных суспензий, содержащих частицы микрокристаллической целлюлозы (МКЦ). Что позволило установить зависимость концентрации дисперсной твердой фазы в фугате от частоты вращения ротора; дисперсного состава твердой фазы; концентрации и расхода, подаваемой на разделение суспензии.

С целью определения основных геометрических размеров биконического ротора были проведены предварительные эксперименты по разделению суспензии микрокристаллической целлюлозы в

центрифуге с цилиндрическим ротором (рис. 1). Ротор имеет следующие размеры: внутренний диаметр 0,048 м, высота 0,05 м, диаметр переливного борта 0,02 м.



1 – ротор; 2 – трубка питающая; 3 – корпус;  
4 – крышка

Рисунок 1 – Схема центрифуги с цилиндрическим ротором

На рисунке 2 показаны результаты исследования процесса осаждения частиц измельченной МКЦ в цилиндрическом роторе, выполненные при заданных технологических режимах.

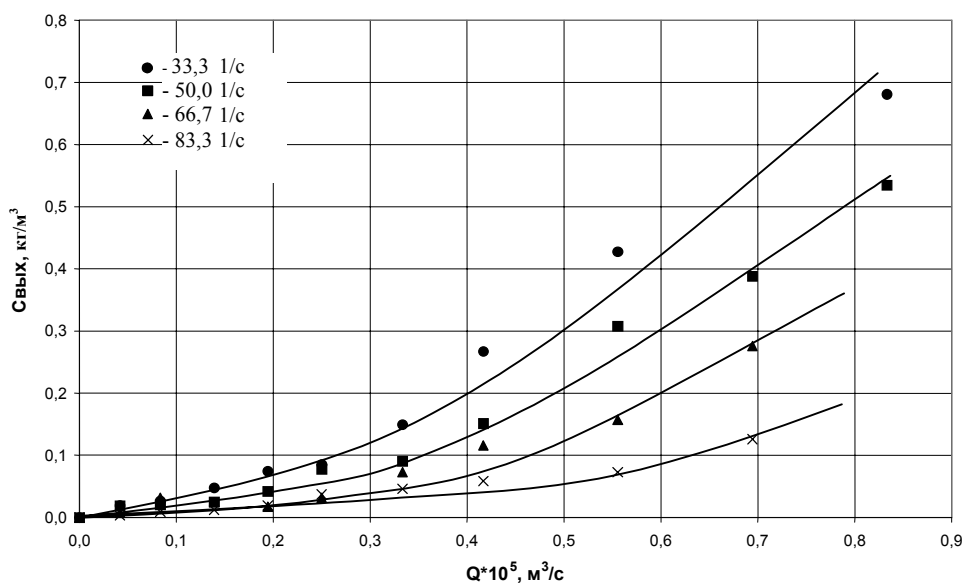


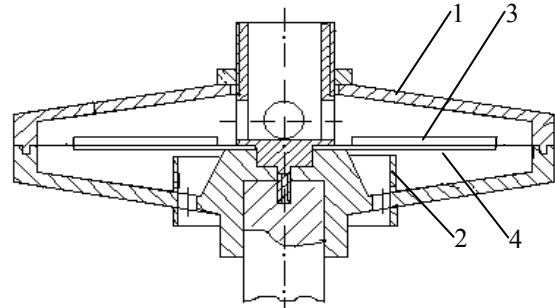
Рисунок 2 – Зависимость концентрации частиц твердой фазы в фугате от расхода суспензии при центрифугировании в цилиндрическом роторе суспензии измельченной МКЦ с исходной концентрацией  $C_{ВХ} = 4,6 \text{ кг/м}^3$  при различных частотах вращения ротора

Результаты центрифугирования (рис. 2) суспензии МКЦ в цилиндрическом роторе показали, что требуемая предельная концентрация частиц микрокристаллической целлюлозы ( $\leq 0,02 \text{ кг/м}^3$ ) на выходе из центрифуги достигается, например, при расходах суспензии, соответственно,  $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $1,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (7,2 и 5,5 л/ч) и концентрациях твердой фазы  $2,3 \text{ кг/м}^3$  и  $4,6 \text{ кг/м}^3$ . Частота вращения ротора при этом составляет 83,3 1/с. Используя уравнения (1) и (2), были рассчитаны основные размеры биконического ротора центрифуги, исходя из следующих допущений: значение параметра  $\beta$ , входящего в уравнения (2) и (3), является константой при переходе от центрифуги с цилиндрическим ротором к центрифуге с биконическим ротором. Минимальная производительность лабораторной центрифуги для аналогичной суспензии микрокристаллической целлюлозы при частоте вращения биконического ротора около 83,3 1/с должна составлять  $\sim (4,17 \dots 5,56) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$  (15...20 л/ч); соотношение внутреннего диаметра и высоты ротора должно быть около 10.

На основе проведенных расчетов, при проектировании лабораторного варианта центрифуги с биконическим ротором, выбраны следующие размеры ротора центрифуги: внутренний диаметр ротора 0,17 м, высота поверхности осаждения 0,018 м, диаметр и толщина диска соответственно 0,16 и 0,002 м. Остальные размеры ротора центрифуги определены исходя из конструктивных соображений и по результатам прочностных расчетов.

Центрифуга состоит из ротора установленного на валу, размещенного в корпусе, который закрыт крышкой с трубкой для подачи исходной суспензии [11]. Все детали ротора центрифуги, а так же устройства для приема фугата и осадка, выполнены из коррозионностойких материалов. Конструктивное выполнение узла крепления ротора к подшипниковой опоре позволяет производить замену одного ротора на другой. В рабочем состоянии ротор центрифуги закрывается корпусом, имеющим камеру для приёма очищенной суспензии из ротора. Привод центрифуги и сама центрифуга закреплены на жесткой раме, установленной на амортизационных прокладках для уменьшения возникающей при работе центрифуги вибрации. В качестве

роторов использовались цилиндрический (рис. 1) и биконический (рис. 3) роторы.



1 – ротор; 2 – вставка цилиндрическая;  
3 – лопасть; 4 – диск  
Рисунок 3 – Схема конструкции биконического ротора

В технической литературе принято сопоставлять разделяющую способность центрифуг по теоретическому индексу производительности. Для обработки экспериментальных данных наиболее широко применяется [12, 13] способ представления полученных результатов в виде зависимости относительного уноса  $e$  (или  $1/e$ ) от числа осветления  $B$  центрифуги.

$$e = \frac{C_{\text{ВЫХ}}}{C_{\text{ВХ}}}, \quad (4)$$

$$B = \frac{Q}{\Sigma}, \quad (5)$$

где  $C_{\text{ВХ}}$  – начальная концентрация твердой фазы в суспензии, подаваемой на разделение,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C_{\text{ВЫХ}}$  – концентрация твердых частиц в фугате,  $\text{кг/м}^3$ .

Качество разделения суспензий в центробежном поле существенно зависит от основных технологических факторов: скорости вращения ротора центрифуги, концентрации и расхода суспензии. В тоже время при использовании центрифуг часто возникает вопрос, насколько будет обосновано и адекватно изменение того или иного технологического параметра, с точки зрения влияния его на эффективность работы центрифуги. Полученные экспериментальные данные, представленные

## РАЗДЕЛЕНИЕ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ В ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГАХ

в виде зависимости  $\epsilon = f(Q/\Sigma)$ , дают хорошую возможность провести такой анализ.

На рисунке 4 приведены данные экспериментов по разделению суспензии

МКЦ в биконическом роторе центрифуги, где показаны зависимости относительного уноса  $C_{\text{ВЫХ}}/C_{\text{ВХ}}$  от числа осветления центрифуги  $Q/\Sigma$ .

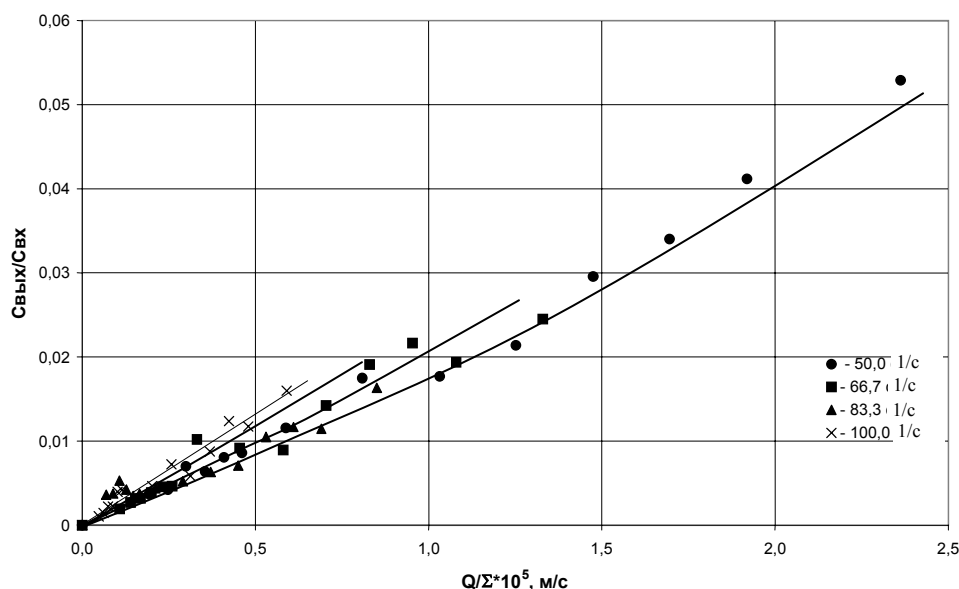


Рисунок 4 – Зависимость относительного уноса  $C_{\text{ВЫХ}}/C_{\text{ВХ}}$  от числа осветления  $Q/\Sigma$  при центрифугировании суспензии измельченной МКЦ с концентрацией  $C_{\text{ВХ}} = 14,4 \text{ кг/м}^3$  при различных частотах вращения ротора

Проведенный сравнительный анализ эффективности работы центрифуги показал, что с увеличением частоты вращения биконического ротора наблюдается некоторое падение эффективности работы центрифуги, хотя при этом снижается концентрация твердой фазы в фугате. Снижение эффективности разделения с увеличением частоты вращения ротора, по-видимому, объясняется наличием зон турбулентности внутри ротора центрифуги, влияние которых на эффективность разделения с увеличением частоты вращения ротора повышается [5], а также тем, что с повышением угловой скорости вращения ротора степень деструкции частиц твердой фазы и их агломератов возрастает [14, 15]. Эффективность работы центрифуги с биконическим ротором повышается при увеличении концентрации исходной суспензии, хотя, как ранее было установлено, при этом наблюдается увеличение

содержания твердой фазы в фугате на выходе из центрифуги.

При центрифугировании в цилиндрическом роторе суспензии измельченной микрокристаллической целлюлозы эффективность процесса разделения также повышается с увеличением концентрации исходной суспензии (рис. 5). Повышение эффективности работы центрифуги при увеличении концентрации суспензии, видимо, обусловлено наличием стесненного осаждения частиц твердой дисперсной фазы, поскольку с увеличением концентрации суспензии вероятность совместного осаждения частиц повышается. Это явление хорошо согласуется с имеющимися литературными данными [13]. Эффективность работы центрифуги с биконическим ротором при разделении суспензии нитроцеллюлозы выше, чем суспензий микрокристаллической целлюлозы,

как с измельчённой, так и с не измельчённой дисперсной фазой.

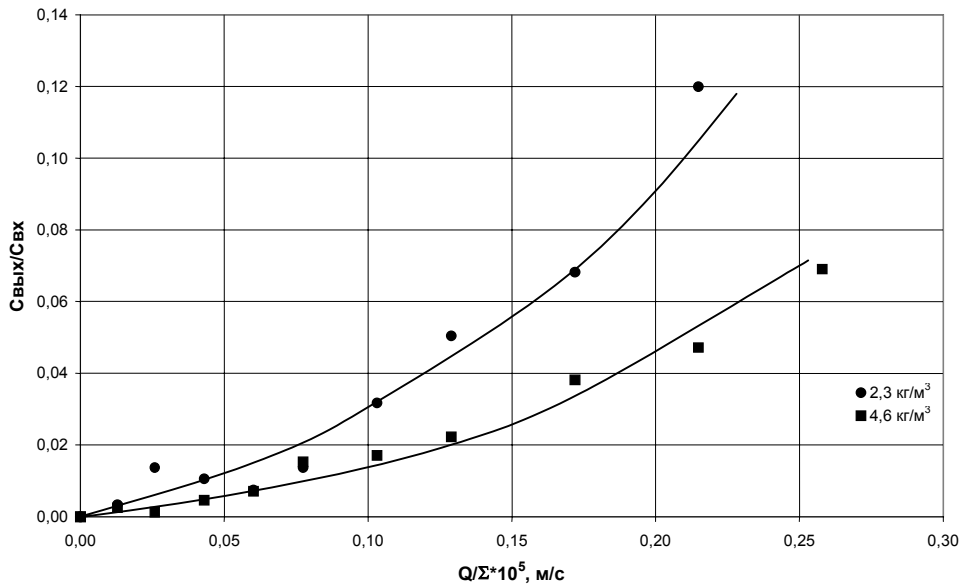


Рисунок 5 – Зависимость относительного уноса  $C_{\text{ВЫХ}}/C_{\text{ВХ}}$  от числа осветления  $Q/\Sigma$  при центрифугировании суспензии измельченной МКЦ с различной концентрацией при частоте вращения цилиндрического ротора  $\Omega = 66,7 \text{ 1/с}$

Для сравнения результатов разделения суспензий, содержащих высокодисперсную твердую фазу, в различных роторах на рисунке 6 приведены данные по осаждению частиц дисперсной фазы водной суспензии порошкообразной МКЦ в биконическом и цилиндрическом роторах.

Из представленных данных видно, что эффективность разделения одинаковых суспензий в центрифуге с биконическим ротором выше, чем в центрифуге с цилиндрическим ротором. Так, рассматривая диапазон изменения числа осветления того и другого ротора в пределах от  $0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$  до  $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ , можно отметить, что эффективность работы биконического ротора превышает эффективность цилиндрического ротора в 5...6 раз. Как следует из полученных результатов, степень очистки зависит от частоты вращения ротора центрифуги, расхода и концентрации подаваемой на разделение суспензии. При увеличении частоты вращения ротора качество разделения суспензии повышается, а при увеличении, как расхода, так и концентрации суспензии, качество разделения снижается. Такой эффект действителен во всем исследованном диапазоне частот вращения

ротора центрифуги, расхода и концентрации исходной суспензии.

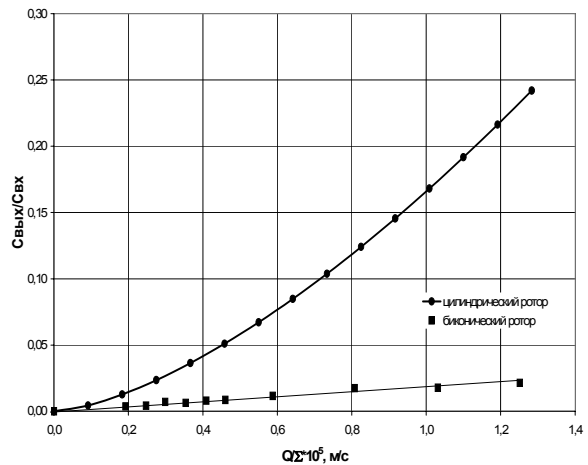


Рисунок 6 – Зависимость относительного уноса  $C_{\text{ВЫХ}}/C_{\text{ВХ}}$  от числа осветления  $Q/\Sigma$  при разделении водной суспензии МКЦ в цилиндрическом и биконическом роторах при частоте вращения ротора  $50,0 \text{ с}^{-1}$

В качестве меры, способствующей снижению затрат при изготовлении

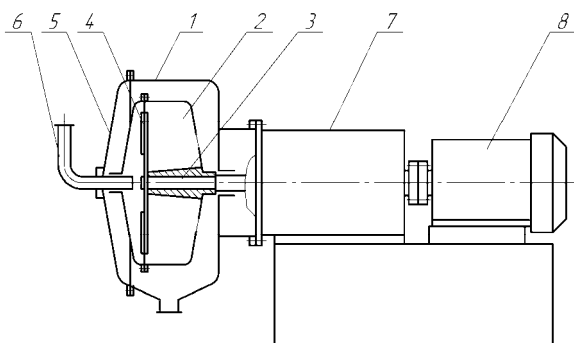
## РАЗДЕЛЕНИЕ МАЛОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ В ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГАХ

центрифуги с биконическим ротором, можно рекомендовать использование привода от фильтрующей центрифуги марки 1/2 ФГП-40 или дисковой мельницы МД-30. Разработанная центрифуга может быть использована в существующих схемах очистки технологических вод, а также промышленных и бытовых сточных вод.

Для фазы очистки сточных вод производства нитратов целлюлозы рассчитан оптимальный режим работы центрифуг. При расчете принималось, что концентрация продукта в суспензии, поступающей на центрифугирование, изменяется в пределах (0,05...1,20) кг/м<sup>3</sup>. Максимально возможный уровень накопленного осадка не превышает половины шламового пространства ротора центрифуги, частота вращения диска ротора, на стадии выгрузки осадка, ~ равна 1 с<sup>-1</sup>; расход промывной жидкости составляет менее 0,004 м<sup>3</sup>/с. В качестве данной жидкости можно использовать техническую воду или сточную воду отводимую в ловушку.

Рекомендуемый режим работы осадительной центрифуги: частота вращения ротора (30-50) 1/с; продолжительность центрифугирования (20-30) минут; продолжительность выгрузки осадка, включая остановку и ускорение ротора по завершении процесса выгрузки осадка 3 минуты; объём промывной жидкости ~ 0,3 м<sup>3</sup>.

На рисунке 7 представлена схема горизонтальной центрифуги с биконическим ротором. Исходная суспензия по трубе 6 подается в ротор 2, установленный в корпусе 1, и приобретает вращательное движение. Вращение вала 3, диска 4 и ротора осуществляется от привода 8 размещенного на станине.



1 – корпус; 2 - ротор; 3 – вал; 4 – диск;  
5 – крышка; 6 – труба; 7 – подшипниковый узел; 8 – привод

Рисунок 7 – Схема осадительной центрифуги

В результате проведенных исследований разработана конструкция центрифуги с биконическим ротором, и варианты ее исполнения, предназначенная для разделения малоцентрированных суспензий, содержащих высокодисперсную твердую фазу. Изучен процесс центробежного разделения суспензий микрокристаллической целлюлозы в центрифугах с биконическим и цилиндрическим роторами. Выявлены основные закономерности процесса разделения суспензии нитроцеллюлозы в биконическом роторе центрифуги. На основании экспериментальных данных и методов геометрического подобия определены основные технологические и конструктивные параметры промышленной центрифуги. Получены выражения и номограмма, которые позволяют рассчитывать конструктивные и технологические параметры осадительных центрифуг с биконическим ротором.

### Литература

1. Лукьяненко В.М., Таранец А.В. Центрифуги. - М.: Химия, 1988. - 384 с.
2. Малиновская Т.А., Кобринский И.А., О. С. Кирсанов О.С., В. В. Рейнфарт В.В. Разделение суспензий в химической промышленности. - М.: Химия, 1983. - 264 с.
3. Шкоропад Д.Е. Центрифуги для химических производств. - М.: Машиностроение, 1975. - 248 с.
4. Романков П.Г., Плюшкин С.А. Жидкостные сепараторы. - Л.: Машиностроение, - 1976. - 256 с.
5. Соколов В. И. Центрифугирование. - М.: Химия, 1976. - 408 с.
6. Соколов В.И., Соколов Н.В. Совершенствование процесса сепарирования жидких неоднородных систем // Хим. и нефт. машиностроение. - 1986. - № 3. - С. 15-16.
7. Семенов Е.В., Жуков В.Г., Карамзин В.А. Обоснование форм рабочих полостей сепараторов и центрифуг для слабоцентрированных суспензий // ЖПХ. - 1985. - Т. 58. - № 9. - С. 2055-2058.
8. Семенов Е.В., Карамзин В.А., Поляков В.И. Расчет формы рабочей поверхности центрифуги // ТОХТ. - 1985. - Т. 19. - № 4. - С. 564-567.
9. Скворцов Л.С. Исследование разделительной способности осадительного пространства центробежного сепаратора-очистителя // ТОХТ. - 1984. - Т. 18. - № 3. - С. 346-353.
10. Donley H.E. Effects of centrifugal shape on the separation of a mixture / H. E. Donley, W. H. Ingham // Separ. Sci. and Technol. - 1987. - Vol. 22. - № 7. - P. 1691-1710.

11. Светлов С.А., Волков Ю.П. Очистка жидких сред от высодисперсной твердой фазы с использованием осадительных центрифуг // Хим. промышленность. - 2004. - Т. 81. - № 5. - С. 230-235.

12. Виноградова М.Г., Романков П.Г. Расчет эффективности сепарирования с учетом вторичного уноса // ТОХТ. -1977. - Т. 11. - № 6. - С.1-3.

13. Шкоропад Д.Е., Новиков О.П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. - М.: Химия, 1987. - 256 с.

14. Виноградова М.Г., Плюшкин С.А., Романков П.Г. Об уносе в слив частиц суспензии, превышающих крупность разделения сепаратора // ЖПХ. - 1971. - Т. 44. - № 11. - С. 2467-2472.

15. Виноградова М.Г., Плюшкин С.А., Романков П.Г. Определение разделяемости дисперсно-неустойчивых систем при их центрифугировании // ЖПХ. - 1973. - Т. 46. - № 8 - С. 1729-1734.