

РАЗРАБОТКА ФИЛЬТРУЮЩИХ ЦЕНТРИФУГ

Г.М. ЧУДАКОВ, М.Г. ИВАНОВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2*

В статье представлен литературный обзор с критическим анализом этапов разработки теории и практики разработки конструкции фильтрующих центрифуг для разделения вязких неоднородных суспензий.

Ключевые слова: тонкослойное центрифугирование, центрифугирование жидких концентрированных суспензий, эффективность центрифугирования

В промышленном производстве часто приходится решать технологические задачи наиболее полного и эффективного извлечения ценного осадка или оттока из неоднородных систем, например, суспензий. В основе процессов разделения неоднородных систем заложен принцип относительного перемещения дисперсионной жидкой среды и дисперсной твердой фазы под воздействием силового поля. Способом осаждения разделяют неоднородные системы, имеющие высокую эффективную плотность, то есть значительную разницу плотностей жидкой среды и твердой фазы. Для успешного разделения способом фильтрования необходим перепад давлений на фильтрующей перегородке при существенных размерах частиц твердой фазы.

Осаждение и фильтрование выполняют в поле действия гравитационных, гидростатических или центробежных сил в специальном технологическом оборудовании – отстойниках, фильтрах, центрифугах, гидроциклонах. Режимы и условия разделения выбирают в зависимости от эффективной плотности, вязкости жидкой среды, концентрации суспензии и размеров частиц твердой фазы, а также с учетом параметров поверхности раздела и приоритета относительного перемещения фазы [3, 4].

Гидромеханические процессы разделения суспензий многофакторные, но обладают некоторыми общими закономерностями. Особенности движения твердых частиц и жидкой среды при разделении суспензий способом осаждения и фильтрования детально представлены в разделах гидродинамики.

Вязкость дисперсионной жидкой среды проявляется при ее движении и является важным фактором, который необходимо учитывать при определении качественных и количественных показателей – степени разделения, эффективности и интенсивности процесса. Повышенная вязкость значительно усложняет процесс разделения. На величину вязкости влияют рабочая температура и влажность. При охлаждении или подсыхании продуктов разделения значительно увеличивается вязкость пленки жидкости на поверхности твердых частиц, что снижает степень разделения.

Скорости осаждения и фильтрования зависят от концентрации суспензии, сопротивления среды, размеров и формы частиц и др. С повышением концентрации суспензии замедляется ее разделение и скорость осаждения из-за постоянного столкновения твердых частиц между собой. Размер, форма и однородность частиц твердой фазы формируют структуру осадка и являются одним из определяющих факторов процесса разделения. Влияние указанных факторов на производительность и скорость разделения учитывается коэффициентами формы и концентрации твердой фазы.

Скорость разделения по результатам исследований многих авторов [6, 8] пропорциональна квадрату диаметра частиц. При разделении суспензий с неоднородным составом частиц более мелкие из них глубже проникают в каналы, образованные крупными частицами, и делают их извилистыми и узкими, что увеличивает гидравлическое сопротивление осадка. Присутствие частиц твердой фазы разных размеров и формы намного усложняет процесс разделения, повышая сопротивление осадка. Не поддаются выделению осаждением и фильтрованием очень мелкие частицы осадка с размером менее 0,005 мм и коллоидные с размером менее 0,001 мм [6, 12, 14].

При расчете аппаратов следует максимально определить основные и вспомогательные параметры процесса разделения, составить материальные балансы, вычислить концентрации, плотности и количества всех веществ, например, количество влажного и сухого осадка. Если задана концентрация

суспензии, то по справочным таблицам с учетом рабочей температуры можно определить ее плотность и вязкость.

Необходимым условием эффективной работы аппаратов является соответствие фактического времени пребывания суспензии в рабочей камере и расчетной продолжительности процесса разделения. Для этого с учетом режима обтекания, формы твердых частиц и концентрации определяют продолжительность разделения, сопротивление и скорость разделения. Целью расчетов является определение поверхности разделения. Проектные и проверочные расчеты выполняют с использованием однозначных расчетных формул.

Производительность - один из основных параметров аппаратов, с учетом которого требуется решать производственные задачи: для данного аппарата проверить соответствие фактической и проектной производительности или разработать технические мероприятия по его модернизации; по известной проектной производительности определить рабочие размеры аппарата или подобрать из каталога модель готового аппарата. Производительность аппарата задают по исходной суспензии или по выходу продукта (осадка и осветленной жидкости).

Применение центробежного поля в гидроциклонах, отстойных и фильтрующих центрифугах дает возможность в сотни раз увеличить интенсивность и эффективность разделения. Во многих случаях [6-8] для вязких мелкодисперсных концентрированных трудноразделяемых суспензий способ центрифугирования с применением мощного центробежного силового поля дает единственную возможность получения качественных продуктов.

Впервые центробежное силовое поле использовали для отжима белья прачечных цехов. Более 160 лет центрифугирование, как способ разделения утфелей, широко используют на сахарных заводах взамен длительного процесса отстаивания [7]. Специфические свойства утфеля и сложность его разделения приводят к необходимости создания специальных центрифуг.

Наибольшее распространение получили центрифуги периодического действия. В 1851 г. сахарная промышленность получила первую серийную центрифугу Феска с нижним ременным приводом от общей трансмиссии с верхней ручной загрузкой и выгрузкой. Несколько позднее появились центрифуги немецкой системы Рудольфа с облегченной выгрузкой сахара через отверстия в днище ротора. Примерно до 1930 г. применялись более совершенные центрифуги английской системы Вестона подвесного типа с нижней ручной выгрузкой и верхним расположением привода. Первые центрифуги имели низкие технико-экономические показатели и были неудобны в обслуживании [7].

При центрифугировании утфелей 1 кристаллизации нагрузка на 1 м² рабочей поверхности сита ротора составляет 200-250 кг. С появлением быстроходных центрифуг продолжительность центрифугирования утфелей промежуточной и последней кристаллизации удалось сократить до 5-15 минут. Толщина слоя утфеля на фильтрующем сите ротора в процессе совершенствования центрифуг увеличилась от 100 до 150 мм. Для центрифуги ФПН -125 1Л (2)3, имеющей емкость рабочей камеры ротора 0,435 м² (650кг) и площадь фильтрующего сита 3,14 м², толщина слоя утфеля составляет 138 мм, а нагрузка на 1 м² приходится 207 кг.

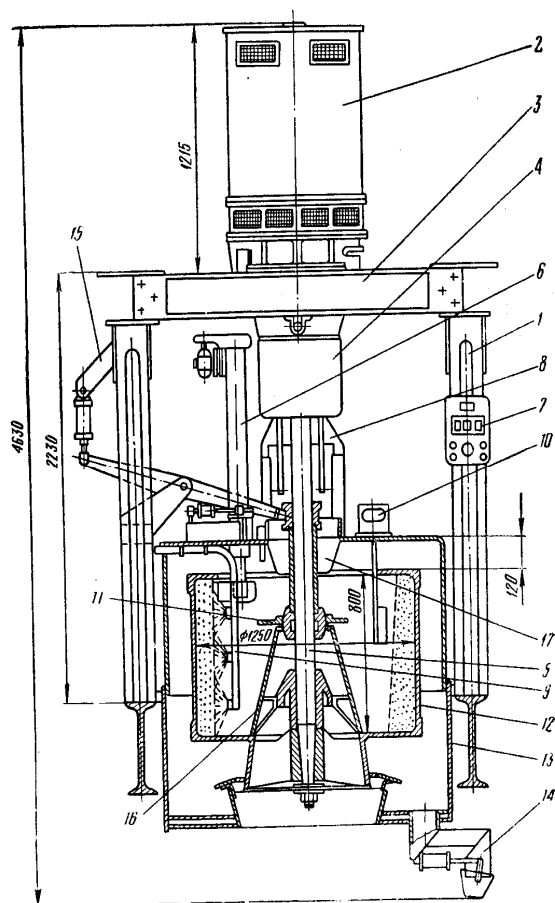


Рисунок 1 - Автоматизированная циклическая центрифуга ФПН-125 1Л - (2)З (АПН –1250) Сумского машиностроительного завода им. Фрунзе : 1 – металлоконструкция; 2 – электродвигатель; 3 – коробка; 4 – привод; 5 – вал; 6 – механический нож выгрузки осадка; 7 – пульт управления; 8 – питатель; 9 – узел промывки; 10 – датчик загрузки; 11 – диск распределительный; 12 – ротор; 13 – кожух; 14 – сегрегатор; 15 – поддон; 16 – конус; 17 – лоток

Возрастающие требования к качеству выпускаемого сахара и стремление к сокращению рабочей силы ускорили разработку и выпуск полностью автоматизированных центрифуг периодического действия, работающих по замкнутому циклу [15] (рис. 1). Стремление к максимальному и быстрому отделению межкристального раствора от кристаллов сахара привело к созданию быстроходных центрифуг с частотой вращения ротора 1500 мин^{-1} и выше. Заметно увеличилось количество конструкций изготавливаемых центрифуг, механизирована загрузка утфеля и выгрузка сахара, осуществлен переход от полуавтоматизированных саморазгружающихся центрифуг к <http://ntk.kubstu.ru/file/436>

полностью автоматизированным [16]. Были построены центрифуги периодического действия с разовой загрузкой до 2000 кг утфеля, центрифуги, работающие с 24 циклами в час при центрифугировании утфеля I продукта.

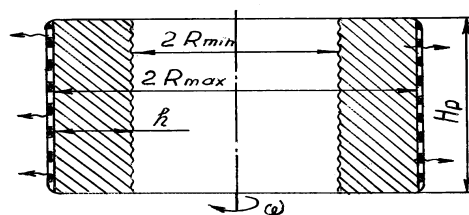


Рисунок 2 - Схема циклического центрифугирования.

Все попытки разработчиков повысить эффективность циклических центрифуг за счет увеличения напряженности центробежного поля, разовой загрузки ротора (до 750 кг, слоем до 90...200 мм), частоты циклов (до 28 в час) при сокращении продолжительности циклов (до 2 мин.) приводят к значительному увеличению энергозатрат (рис. 2). Цикличность работы, большие нагрузки по току в момент запуска ротора с суспензией, сложность системы управления, значительный расход рабочей силы при эксплуатации и ремонте свидетельствуют о том, что циклические центрифуги не отвечают требованиям современной техники и технологии.

К современным типам циклических центрифуг [14] относятся, например, центрифуга БМА с разовой загрузкой до 1000 кг утфеля, приводимая в движение от многоскоростного электродвигателя переменного тока и полностью автоматизированная центрифуга "Компакт", выпускаемая французской фирмой "Фив-Лиль-Кай". Один из типов центрифуги "Компакт" приспособлен для загрузки 1300 кг утфеля с числом циклов при центрифугировании утфеля 1 кристаллизации от 24 до 28. Немецкая фирма «Siemens» поставляла в 32 страны мира более 250 центрифуг, имеющих 28 циклов в час и разовую загрузку 2000 кг. Широко применяются другие типы автоматизированных центрифуг периодического действия (табл. 1): "Букау-Вольф" (ФРГ), "Гейн-Леман"(ФРГ), "Зангерхаузен"(ФРГ), "Сильвер" (США), "Эшер-Висс" (Швейцария), "Цекоп" (Польша) и другие. Промышленность

выпускает также полностью автоматизированные центрифуги (рис. 1) периодического действия типа ФПН-125.1Л-2(3) с числом циклов в час до 20 и разовой загрузкой 650кг.

Таблица 1 Технические показатели фильтрующих центрифуг циклического действия отечественного и зарубежного производства

Показатели центрифуг	ФПН-125 1Л-2(3) Сум. маш завод)	ФПН-100 1V-1 (ПН-1000)	ФПН-120 1V-2 (ПС-1200)	«РОБЕРТС» Франция	«БУККАУ ВОЛЬФ» (ФРГ)
Диаметр ротора (D) мм	1250	1000	1200	1220	1250
Высота ротора , (H) мм	800	750	900	762	1050
Частота вращения (n) мин ⁻¹	1500	1500	1000	1500	1500
Фактор разделения (Fr)	1560	1250	670	1525	1560
Площадь фильтр. сита, (F)	3,1	2,3	3,0	2,87	4,02
Рабочий объем ротора	470	300	325	-	-
Предельная масса	700	450	500	500	850
Продолжит. раб. цикла,	3-15	3,5-20	5-35	2,5-15	3-15
Мощность привода,	90	40	40	30	-

Многие исследователи исследовали для центрифуг периодического действия влияние величины фактора разделения на интенсивность отделения межкристалльного раствора утфелей различной чистоты [5, 7].

$$Fr = \frac{a}{g} = \frac{\omega^2 R}{g} = \frac{n^2 R}{900} \quad (1)$$

где n - частота вращения ротора, мин⁻¹;

ω - угловая скорость вращения ротора, рад/с;

D, R - наибольший внутренний диаметр и радиус ротора, м;

g - ускорение силы тяжести, м/с², равное 9,81 м/с²;

a - ускорение центробежного поля, м/с².

Разделяющую способность центрифуг В.И. Соколов [14] предложил оценивать по величине индекса производительности, который в общем случае

для фильтрующих центрифуг периодического действия можно представить в виде

$$\Sigma = S Fr = \frac{V_{\Pi} \cdot n^2}{900 \cdot \ln \frac{R}{R_0}}, \text{ м}^2, \quad (1)$$

где S - осредненная рабочая поверхность разделения, м;

Fr - осредненный фактор разделения центрифуги;

V_{Π} - полезный объем ротора, м³;

R_0 - минимальный рабочий радиус, м.

Например, индекс производительности фильтрующей центрифуги периодического действия диаметром ротора 1220 мм, частотой вращения ротора 900 мин⁻¹, высотой ротора 500 мм, минимальным рабочим радиусом 440 мм, при толщине слоя исходного утфеля 170 мм и полезным объемом ротора

$$V_{\Pi} = \pi (R - R_0) H = 3,14 (0,61 - 0,44) 0,5 = 0,28, \text{ м}^3 \quad (1.3)$$

равен

$$\Sigma = \frac{0,28 \cdot 900^2}{900 \cdot \ln \frac{0,61}{0,44}} = 775, \text{ м}^2 \quad (1.4)$$

М.Д. Зуев в «Энциклопедии свеклосахарного производства» выделяет следующие параметры процесса: окружную скорость ротора, с которой он связывает интенсивность разделения; площадь фильтрующего сита, его живое сечение, форма и размеры отверстий; качество утфеля, определяемое концентрацией кристаллов сахара, их размерами, однородностью кристаллов, наличием или отсутствием мелких кристаллов – «муки»; качество утфеля, определяемое величиной вязкости межкристалльного раствора. При выборе размеров ротора центрифуг, частоты вращения и расчете потребного количества центрифуг продуктовых отделений сахарных заводов М.Д. Зуев учитывает площадь фильтрующего сита, коэффициент производительности и удельную производительность на 1 м² сита. Он отмечает, что при условии, когда перерабатываемый утфель будет одинакового качества как по размерам

кристаллов сахара, так и по степени вязкости межкристального раствора, можно считать одинаковой удельную производительность двух центрифуг [7].

Первые работы не могли охватить всего комплекса факторов, от которых зависит процесс центрифугирования, а поэтому служили для выявления и качественной оценки влияния отдельных факторов. Математические зависимости между различными факторами были установлены лишь для некоторых из них. Теоретические исследования в этой области относились почти исключительно к вопросам прочности, а экспериментальные исследования были многочисленными и лишены необходимой теоретической основы [13].

Вязкость межкристального раствора является основным качественным параметром утфелей, так как от ее величины зависит остаточная толщина пленки на поверхности кристаллов сахара, а следовательно, полнота разделения и качество отцентрифугированного сахара [6-8].

Многие авторы указывают на кристаллоструктуру, как на один из основных технологических факторов. Однородная крупная кристаллоструктура утфеля позволяет отделить в центрифугах периодического действия мелассу с большой вязкостью, т.е. с большой концентрацией сухих веществ и меньшей чистотой. Для повышения эффективности центрифугирования надо вырабатывать исходный утфель в соответствии с технологическими требованиями [7, 8]. Для устойчивой и ритмичной работы центрифуг при разлении утфелей необходимо обеспечить заданный гранулометрический состав утфеля и не допускать в утфеле мелкокристаллической фракции сахара – «муки».

Первым крупным исследованием процесса центрифугирования сахарных утфелей стала работа Г.М. Знаменского «Теория центрифугирования утфелей» [8]. Он выделяет две стадии процесса (рис. 3).

Первая стадия аналогична обычной фильтрации с образованием осадка – центробежная фильтрация, которая сопровождается кратковременным и мало интенсивным отстаиванием кристаллов в среде межкристального раствора.

Вторая - состоит в освобождении пор между кристаллами сахара от межкристального раствора.

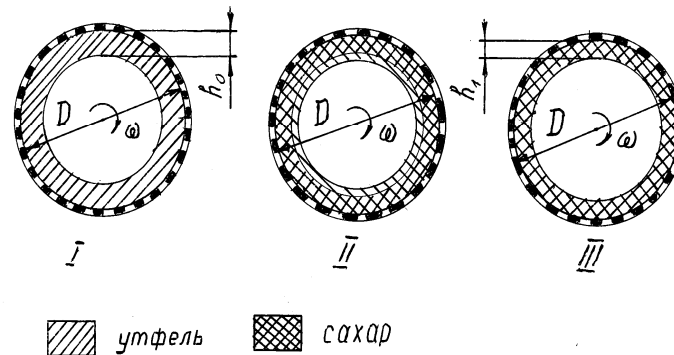


Рисунок 3 - Схема чередования стадий процесса центрифугирования урфеля по Г.М. Знаменскому и В.И. Соколову

Для каждой из этих стадий Г.М. Знаменский на основании закона фильтрации Дарси выводит отдельные формулы продолжительности процесса.

$$G = K_{\phi} \cdot i \cdot S \cdot \tau, \quad (5)$$

где G – объем выделенного оттока, м^3 ;

i – пьезометрический уклон;

S – фильтрующая поверхность, м^2 ;

τ – продолжительность процесса, с;

K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/с:

$$K_{\phi} = 0,12 \frac{d^2}{\nu}, \quad (6)$$

d – эффективный диаметр кристаллов, равный размеру той фракции кристаллов отсева, вес которой составляет 10% и определяется на основании ситового анализа, м;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ_1, τ_2 - продолжительность первой и второй стадий процесса, с

$$\tau_1 = \frac{h_1^2}{K_{\phi} \cdot K_D \cdot \omega^2 (h_0 + h_1) \cdot V} \quad (7)$$

$$\tau_2 = \frac{m \cdot (D \cdot h_1 - h_1^2)}{K_\phi \cdot K_D \cdot D \cdot \omega^2} \quad (8)$$

h_0 , h_1 – толщина слоя продукта на фильтрующем сите в начале и в конце первой стадии;

K_D – коэффициент, зависящий от диаметра ротора;

ω – угловая скорость ротора центрифуги, c^{-1} ;

$$V = \frac{100 - \alpha}{x}; \quad x = \frac{a - 25.6}{0.744}; \quad (9)$$

a – объемный процент межкристального раствора утфеля в центрифуге (в процентах к объему всего утфеля);

x – количество межкристального раствора, вытекающего в период уплотнения утфеля

m – коэффициент пористости, определяющий какую часть объема утфеля занимает объем пор ($m = 0,256$).

Центрифугированием полностью удалить межкристальный раствор невозможно. В конце второй стадии процесса на поверхности кристаллов остается пленка, толщина которой найдена из условия динамического равновесия центробежных сил и сил вязкости:

$$b = \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot h_1 \cdot g}{\tau_2 \cdot \gamma \cdot \omega^2 \cdot R}}, \quad (10)$$

где b – толщина пленки на поверхности кристаллов сахара, м;

γ – удельный вес жидкости, $кг/м^3$.

Большой вклад в теорию процесса циклического центрифугирования внесли работы В.И. Соколова [14]. В процессе центробежной фильтрации он выделяет три характерных периода (рис. 3): образование осадка, уплотнение его и механическая сушка. Он отмечает, что в зависимости от свойств суспензии процесс может состоять из двух, а иногда из одного периода. Замедление отделения межкристального раствора во втором периоде он объясняет действием капиллярных сил. Он считает, что соотношение этих сил

может меняться, что затрудняет установление математических зависимостей. По его мнению адсорбционная, а также часть пленочной и капиллярной жидкости не может быть удалена центрифугированием.

В работах других исследователей этот вопрос был изучен и дополнен [6, 8, 14]. По мере углубления теории процесса циклического центрифугирования совершенствовалась его математическая модель. На основе экспериментальных данных М.И. Даишев [6] установил, что при центрифугировании утфелей со средним размером кристаллов более 0,1 мм влиянием капиллярных сил можно пренебречь, так как процесс заканчивается фактически раньше, чем начинают существенно проявляться их действие. На основании этого вывода М.И. Даишев вторую стадию процесса центрифугирования рассматривает как стекание пленки межкристального раствора с поверхности кристаллов под действием центробежных сил. Он вывел критерий гомохронности для определения влияния основных факторов процесса на продолжительность центрифугирования

$$H_0 = \frac{\omega^2 \cdot R_{CP} \cdot \rho \cdot d \cdot \tau}{\mu \cdot h_0} \quad (11)$$

Из этих предпосылок им была получена формула общей продолжительности процесса циклического центрифугирования утфеля (без промывки).

$$\tau = \frac{\mu \cdot h_0}{K_{Ц} \cdot \omega^2 R_{CP} \cdot \rho \cdot d^2 q^2} \quad (12)$$

где τ - время центрифугирования утфеля, с;

μ - динамическая вязкость межкристального раствора, Па·с;

h_0 - приведенная толщина слоя кристаллов (без пор), м;

$K_{Ц}$ - постоянная центрифуги, зависящая от размеров и формы фильтрующей поверхности ;

ρ - плотность межкристального раствора, кг/м³;

d - средний размер кристаллов сахара, м;

q - объем межкристального раствора в единице объема сахара.

Для производственных условий продолжительность процесса центрифугирования определена П.М. Силиным в зависимости от качества утфелей разных ступеней кристаллизации [13]. Для утфелей 1 продукта продолжительность процесса центрифугирования, например, в центрифуге системы Вестона модели ФПН-122 1Л-1 (АПН-1220) составляет 4 минуты при следующих данных: размеры ротора 1220x500 мм, содержание кристаллов в исходном утфеле - 55%, температура утфеля при центрифугировании - 70 °С, частота вращения ротора - 900 мин⁻¹. Продолжительность центрифугирования увеличивается до 16 минут при разделении утфеля второй кристаллизации, имеющего содержание кристаллов сахара - 42 %, температуру при центрифугировании – 40°С . А при разделении утфеля третьего продукта продолжительность процесса составляет 25 минут и более, но иногда не удается получить удовлетворительной очистки кристаллического сахара.

Разделение мелкокристаллического утфеля происходит медленно, но равномерно [7, 14]. Межкристальный раствор при крупных кристаллах сахара отводится быстро и наиболее полно. Эффективность разделения утфелей со смесью кристаллов разных размеров значительно ниже, чем с равномерными кристаллами. При центрифугировании мелкокристаллических утфелей целесообразно использовать более высокие факторы разделения. Однако применение даже быстроходных центрифуг при разделении мелкокристаллических утфелей полностью не решает вопросы получения удовлетворительного качества сахара и снижение его потерь с оттеками [6, 7].

Выбор оптимальных технологических показателей и рациональное ведение процесса центрифугирования оказывает существенное влияние на качество разделяемых продуктов. В работах [6, 12, 13,] рассмотрены технологические особенности процесса центрифугирования и свойства сахарных утфелей.

Улучшить качество отцентрифугированного сахара можно, применяя его промывание водой или паром. Однако такой способ приводит к растворению

сахара и потерям его в оттеках. Промывание сахара еще больше усложняет процесс центрифугирования [6, 12, 13]. Большая часть работ по центрифугированию сахарных утфелей посвящена различным способам промывания сахара [6, 7, 12, 13, 19]. Более эффективно при промывании сахара-песка в центрифуге заменять часть горячей воды нагретым сиропом. Другим способом промывания сахара-песка в центрифуге предусмотрена подача 2% второго оттека утфеля 1 кристаллизации, разбавленного до СВ $70 \div 74\%$ и нагретого до $80 \div 85^\circ\text{C}$, и $1,5 \div 2\%$ горячей воды. По замыслу автора промывающий сахарный раствор предварительно нагревает пленку на поверхности кристаллов, а вода смывает ее [19]. Вопросы промывания сахара в центрифугах наиболее полно представлены в работах А.Р.Сапронова [12]. Сравнивая принятые по типовой схеме способы промывания сахара 1 кристаллизации горячей водой в количестве $3 \div 3,5\%$ с температурой $80 \div 90^\circ\text{C}$ и паром в количестве 2% к массе утфеля давлением $0,3 \div 0,4$ МПа, он отмечает, что эти способы приводят к значительному растворению кристаллического сахара, соответственно: 10,2% и 3%, но применение пара приводит к меньшим потерям кристаллического сахара в оттеках, в тоже время, конденсируясь на поверхности кристаллов, он дополнительно нагревает на $18 \div 20^\circ\text{C}$ пленку межкристального раствора, и снижает ее вязкость. Температура отцентрифугированного сахара после промывки горячей водой составляет $35 \div 40^\circ\text{C}$, а по второму способу - около 70°C . Влажность отцентрифугированного сахара - соответственно равна $1,5 \div 2\%$ и $0,5\%$. Промывка паром повышает эффективность сушки сахара за счет его большей температуры, меньшей влажности, а также исключения пылеобразования от растрескивания при нагревании в сушилке [6, 12, 13]. Следует учитывать то обстоятельство, что для выпаривания 1% воды оттеков затрачивают [12] дополнительно 0,02% условного топлива к массе свеклы.

Существенными недостатками центрифуг периодического действия являются [16]: низкая производительность, большие затраты электроэнергии на переработку утфеля, что объясняется частым разгоном массивного ротора до

максимальных оборотов и механической выгрузкой сахара. Цикличность работы, большие нагрузки по току в момент пуска, сложность конструкции систем управления, значительный расход рабочей силы при эксплуатации и ремонте центрифуг и ряд других недостатков свидетельствуют о том, что такие центрифуги не решают проблему полной механизации и автоматизации процесса центрифугирования и не могут полностью соответствовать требованиям современного производства.

Значительным техническим достижением стало создание фильтрующих центрифуг непрерывного действия, работающих по принципу тонкослойного центрифугирования [7, 16]. Центрифуги непрерывного действия прежде, чем утвердиться в качестве типового оборудования прошли длительный период разработки и испытаний от простой конструкции, выполненной по привилегии № 2072 от 15.10.1890 г. русских изобретателей И.С. Щениовского и Г.А. Пионтковского и испытанной в 1889...1893 г. на Капустянском и Ново-Таволжском заводах [7], до современных центрифуг [14, 16] фирм БМА (ФРГ), "Гейн-Леман" (ФРГ), "Зангерхаузен" (ФРГ), "Фив-Лиль-Кай" (Франция), "Сильвер" (США), а также отечественных ФПН-125 1Л.

Фильтрующий ротор центрифуг может быть выполнен коническим с одним конусом (с уклоном сита от 30° до 34°) или с двойным конусом – 22° и 34° . Непрерывность работы конических центрифуг с инерционной выгрузкой сахара обеспечивается непрерывной подачей утфеля и плавным регулированием его количества диафрагменным шибером (рис. 4).

Утфель подают на ускорительную чашу, расположенную в центре ротора и служащей для сообщения утфелю первоначальной окружной скорости, с которой он поступает на фильтрующее сито, равномерно распределяется по его ширине и длине от радиуса подачи R_0 до радиуса схода R_c . В роторе центрифуг протекают одновременно два процесса - центрифугирование утфеля и относительное движение продуктов вдоль наклонного фильтрующего сита от радиуса подачи R_0 до радиуса схода R_c под действием касательной составляющей центробежной силы инерции.

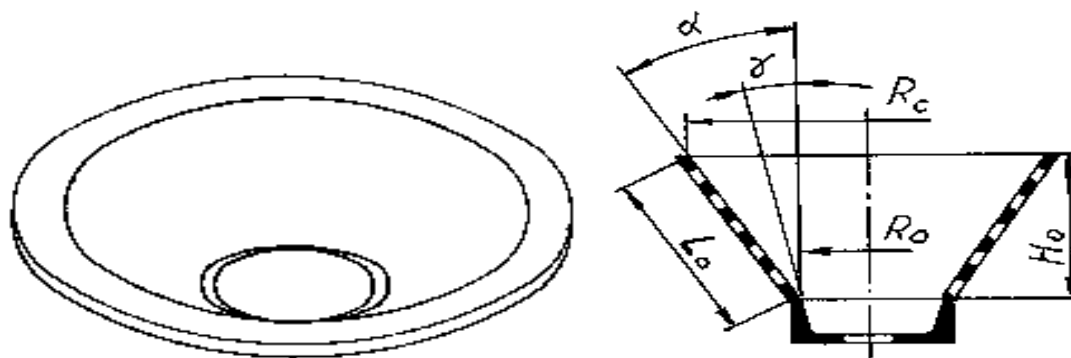


Рисунок 4 - Ротор конических центрифуг непрерывного действия

Устойчивое движение продуктов в роторе (без «срыва» и «заклинивания») возможно при условии равенства их коэффициента трения тангенсу угла наклона фильтрующего сита.

В работах Е.М. Гольдина [5] по теории тонкослойного центрифугирования в центрифугах с коническим ротором представлены: уравнения движения частиц осадка по образующей конического ротора, геометрическая производительность центрифуг. Несмотря на большую ценность этой работы, результаты исследований не могут быть отнесены к общему случаю, так как в ней не учитываются свойства исходной суспензии.

В области тонкослойного центрифугирования в центрифугах с коническим ротором широко известны исследования В.И. Соколова [14], М.И. Ильина [9, 10], А.В. Шлау [18], В.И. Аснера, В.А.Трофимова [9, 18], А.И. Бойцова и др. Поиску оптимальных режимов работы и вопросам создания новых конструкций фильтрующих центрифуг посвящены труды ученых Д.Е. Шкоробада [17], К.И. Пазирука, Б.Н. Терешина [18], Ю.Д. Кота [11], А.Г. Андреева [1], А.Р.Сапронова [12], Н.А. Буренкова [2], С.Ф. Жигалова и др.

Внимание многих разработчиков было сконцентрировано на теоретических вопросах динамики движения продуктов в роторе, поиску конструктивных решений и установлению зависимости производительности от геометрических параметров центрифуг.

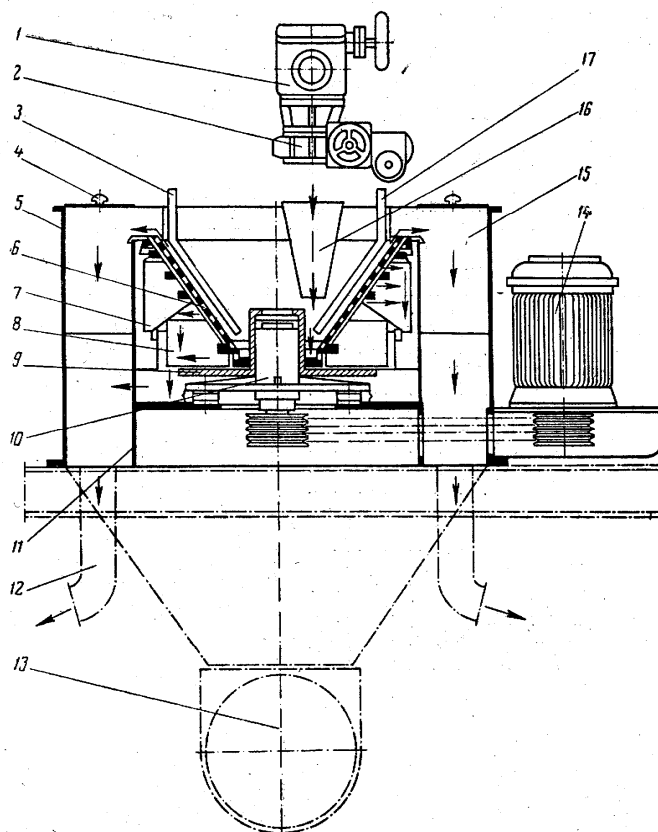


Рисунок 5 - Центрифуга непрерывного действия К-1000 фирмы БМА:

1 - комколовушка; 2 - шибер диафрагменный; 3 - трубопровод для подачи пара; 4 - люк смотровой; 5 - кожух наружный; 6 - ротор конический; 7, 8 - приемники оттеков; 9 - диск стабилизации ротора; 10 - стойка; 11 - рама; 12 - трубы для отвода оттеков; 13 - шнек для осадка; 14- электродвигатель; 15- кольцевой приемник осадка; 16- воронка для подачи суспензии; 17- трубопровод для подачи горячей воды

По мере удаления из утфеля межкристального раствора коэффициент трения увеличивается, а поэтому должен изменяться угол наклона фильтрующего сита от 22° до 36° . В центрифугах с конической формой ротора угол уклона фильтрующего сита остается постоянным на всем пути движения продуктов. Сложность изготовления фильтрующего сита в соответствии с изменением коэффициента трения продуктов – недостаток центрифуг с конической формой ротора. К другим недостаткам следует отнести низкое использование рабочего объема ротора и склонность к возникновению вибрации при неравномерном течении продуктов по фильтрующему ситу.

Этого удалось избежать в центрифугах с лопастным ротором, предложенных в 1961 году изобретателями Ю. Ретелем и М. Ретелем [20]. В нашей стране первая конструкция лопастной центрифуги с лопастной формой ротора диаметром 1000 мм и 2000 мм модели ЦЛСВ-100 и ЦЛСВ-200 были разработаны по инициативе Ю.А. Бухтоярова и К.И. Пазирука и с 1964 года применяются в крахмало-паточной промышленности для обезвоживания клетчатки и выделения крахмала.

Опыт разработки и внедрения лопастных центрифуг был успешно продолжен в угольной промышленности для разделения угольной мелочи [18], в химической для разделения уротропина и пентаэритрита [10, 14, 17], в сахарной для утфелей второго, третьего и аффинационного продуктов [1, 6, 7, 9, 12, 14, 16, 20], в консервной для извлечения фруктовых и овощных соков, в животноводческих комплексах для очистки производственных стоков.

Изобретение фильтрующих центрифуг непрерывного действия с инерционной выгрузкой осадка стало возможным, благодаря открытию принципа «тонкослойного центрифугирования», который предполагал прямо пропорциональную зависимость производительности от величины рабочей поверхности фильтрующего сита и выдвигал производительность в качестве основного достоинства. Поэтому разработчики стремились создать конструкцию с максимальной фильтрующей поверхностью и концентрировали внимание на вопросах динамики движения продуктов в роторе и рациональных форм фильтрующих роторов. Е.М. Гольдиным [5] получены уравнения устойчивого движения частиц осадка по образующей конического ротора, геометрической производительности центрифуг. В работах М.И.Ильина детально рассмотрена геометрия лопастного ротора (рис. 6), найдены уравнения для определения основных геометрических и кинематических параметров центрифуги: длины, ширины и площади фильтрующего сита, соотношения максимального и минимального радиусов фильтрующего сита, количества лопастей в роторе, фактора разделения, индекса производительности. Несмотря на большую ценность этих работ, результаты и

выводы могут быть отнесены к общему случаю со стабильными параметрами исходного утфеля и технологическими условиями центрифугирования.

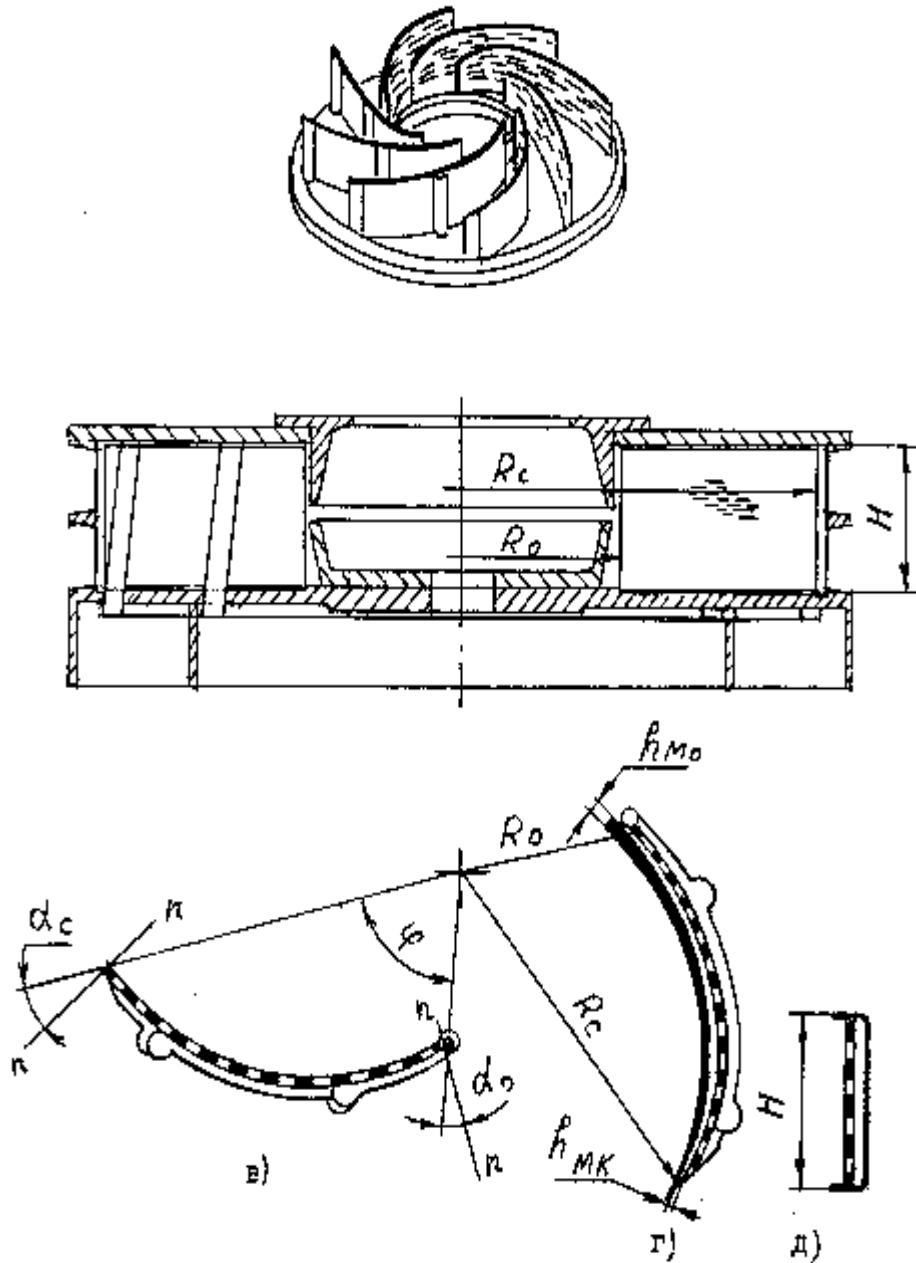


Рисунок 6 - Ротор лопастной центрифуги непрерывного действия.

$$R = R_o \exp \int_{\varphi_o}^{\varphi_c} f(\varphi) d\varphi, \quad (13)$$

где R_0 , R - начальные и текущие радиусы - векторы теоретического профиля, м ;

φ - угол поворота радиуса-вектора, рад;

$f(\varphi)$ - закон изменения коэффициента трения продуктов по фильтрующему сити.

После интегрирования с учетом вариации величин для наиболее общего случая им получено:

$$R = R_0 \exp (f_0 \varphi + \delta \varphi^2) \quad (14)$$

где f_0 - коэффициент трения на радиусе подачи,

δ - коэффициент, определяемый экспериментально.

С целью упрощения изготовления нами предложено использовать дугу окружности или ломаную линию, которые копируют теоретический профиль.

Предложенная им расчетная формула для определения производительности центрифуги имеет вид

$$Q = K^1 S F_{r \max} \quad (1.15)$$

где S - фильтрующая поверхность ротора, м²;

$F_{r \max}$ - фактор разделения, равный

$$F_{r \max} = \frac{\omega^2 R_C}{g} = \frac{n^2 R_C}{900} ; \quad (1.16)$$

где R_C - полярный радиус схода сахара-песка из ротора, м;

ω , n - угловая скорость и частота вращения ротора

$$\omega = \pi \cdot n / 30 ; \quad (1.17)$$

где K^1 - опытный коэффициент пропорциональности, предполагающий получение сахара при постоянных технологических режимах и качества исходного утфеля.

В лопастных центрифугах (рис. 6) фильтрующая поверхность каждой лопасти имеет форму цилиндрической поверхности постоянной высоты с образующими, параллельными оси вращения ротора. Проекция фильтрующей

<http://ntk.kubstu.ru/file/436>

поверхности лопасти на плоскость, перпендикулярную оси вращения, представляет собой ее профиль. Профиль фильтрующей поверхности лопастной центрифуги выполнен в виде спирали, параметры которой определяются свойствами суспензии. Построенный таким образом профиль фильтрующей поверхности по сравнению с коническим ротором более точно учитывает изменения коэффициента трения и физических свойств перерабатываемого утфеля. Для разделения утфелей угол наклона фильтрующего сита должен изменяться от 22° на радиусе подачи до 36° на максимальном радиусе – радиусе схода. Конструкция лопастного ротора обеспечивает плавный переход от меньшего угла наклона фильтрующего сита к большему углу. М.И. Ильин предложил формулу для расчета текущего значения радиуса-вектора точек теоретического профиля

Особенность центрифуги состоит в том, что утфель движется по фильтрующему сити, имеющему щелевидные отверстия размером $0,06 \div 0,09$ мм. При этом происходит просеивание утфеля - более мелкие кристаллы сахара и межкристальный раствор проходят через сито, а основная кристаллическая масса через верхнюю кромку ротора поступает в приемник сахара. Таким образом, в оттек поступает весь без исключения мелкий кристалл, в том числе и "мука". Поэтому чистота оттека будет сравнительно выше. Это большой недостаток центрифуг с инерционной выгрузкой осадка. Известны технические решения по использованию оттеков с кристаллами до $0,1$ мм в качестве кристаллической основы для уваривания утфелей последней кристаллизации. В циклических центрифугах прилегающие к фильтрующему сити кристаллы сахара образуют своды над щелевыми отверстиями ($0,34$ мм) и задерживают мелкие кристаллы в слое осадка при центробежной фильтрации.

Работая по принципу тонкослойного разделения, центрифуги непрерывного действия требуют более качественного и тонкого распыления промывной жидкости или предварительного смешивания при аффинации.

Открытая и интенсивно обдуваемая внутренняя полость ротора, способствует быстрому испарению влаги и охлаждению разделяемого утфеля,

значительному увеличению вязкости межкристального раствора и ее подсыханию в виде пленки на поверхности кристаллов. За счет этого явления 5-8% (к массе утфеля) межкристального раствора в виде тонкой пленки остается на поверхности кристаллов, снижая степень разделения и качество кристаллов сахара.

Специалисты сахарной промышленности работают над созданием эффективных способов настройки режима работы непрерывно действующих центрифуг [1]. Так, немецкая фирма БМА разработала систему автоматической подачи утфеля в центрифугу в зависимости от активной мощности приводного электродвигателя [14]. Такая система настройки и регулирования работы фактически стабилизирует массовый расход утфеля и не позволяет стабилизировать качество отцентрифугированных продуктов. Работниками МТИПП [1] предложен способ управления процессом разделения подачи утфеля на разделение путем определения границы между зоной интенсивного отделения межкристального отека и зоной сушки, по контрасту цветов продуктов, отслеживания местоположения границы и сравнение с заданным оптимальным значением. Для реализации этого способа необходимо в рабочей зоне над фильтрующим ситом разместить источник направленного освещения и приемный светодиод. А это затруднит выполнение промывки и пропарки кристаллов. Известный способ управления процессом тонкослойного центрифугирования не получил практической реализации для лопастных центрифуг, так как лопастью ротор закрыт непроницаемой для света крышкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.Г, Коломиец В.Ф. Исследование геометрических параметров фильтрующих роторов непрерывно действующих центрифуг. «Сахарная промышленность», 1973, № 3, с.25-28.

2. Буренков Н.А. Применение вибрации для ускорения процесса фильтрации.

Труды КТИППа, М., 1950, с 23-37. «Пищепромиздат», 1955, вып. 15.

3. Биркган Ю.Б. Центрифуги, их работа, конструкция и расчет. М., Госмашиздат, 1937.
4. Борисоглебский Б.И. и др. Центрифуги, Каталог-справочник. М., Машгиз, 1965.
5. Гольдин Е.М. О движении материальной точки внутри быстровращающегося конуса. М., изд. АН СССР, 1955, 3 6.
6. Даишев М.И. О методике установления температурного режима кристаллизации и фуговки утфеля последнего продукта. «Сахарная промышленность», 1966, № 6, с.23.
7. Зуев М.Д. Энциклопедия свеклосахарного производства. том 4. Киев, изд. «Сахаротрест», 1926, с. 229-308.
8. Знаменский Г.М. Теория центрифугирования утфелей. Труды КТИППа, вып. 10, М., 1950, с 23-37.
9. Ильин М.И., Чудаков Г.М., Трофимов В.А., Мельник О.Т., Балюра В.А. О работе Центрифуги НВИ-Л-1000-3 для сахара. «Сахарная промышленность» 1972. №6. С 11-15.
10. Ильин М.И., Чудаков Г.М., Данилин С.В., Образцов А.Е., Малевинская Н.П., Накрохин В.Б., Смирнов А.Г. разделение суспензий пентаэритрита на непрерывно действующей лопастной центрифуге. «Химическая промышленность», 1974, № 2, с.76-77.
11. Кот Ю.Д. Математические зависимости процесса центрифугирования утфелей. Труды ВНИИСП, М., «Пищепромиздат», 1964, вып. 2, с. 227-237.
12. Сапронов А.Р. Технология сахарного производства. М.: Колос, 1998. с. 495.
13. Силин П.М. Технология сахара. Изд. 2, М., изд. «Пищевая промышленность», 1967, с. 625.
14. Соколов В.И. Достижения советской научной школы в области центрифугальной техники. «Химическое и нефтяное машиностроение».1967., №11, с.20-24.

15. Томбаев Н.И. Центрифуги пищевой промышленности. М., Машгиз, 1962, с.223.
16. Терешин Б.Н. Современные центрифуги в сахарной промышленности. М., изд. «Пищевая промышленность», 1975, 120 с.
17. Шкоропад Д.Е. Центрифуги для химической промышленности. М., изд. «Машиностроение», 1975, 248 с.
18. Шлау А.В., Зарубин Л.С., Трофимов В.А. Фильтрующие центрифуги. М., изд. «недра», 1956
19. Чудаков Г.М., Ильин М.И., Даишев М.И. Ав. св. СССР № 446316. Бюл. изобр. 1974, № 12. Центрифуга для разделения суспензий.
20. Ю. Ретель, М. Ретель. Центрифуга непрерывного действия с сетчатыми лопастями, вращающимися на общем горизонтальном валу. Пат. 1187803 ФРГ, МКИ В 04 В, НКИ 82 в, 15. 1961.

REFERENCES

1. Andreev V.G, Kolomiets V.F. Issledovanie geometricheskikh parametrov filtruyushchikh rotorov nepreryvno deystvuyushchikh tsentrifug. «Sakharnaya promyshlennost», 1973, № 3, p.25-28.
2. Burenkov N.A. Primenenie vibratsii dlya uskoreniya protsessa filtratsii. Trudy KTIPPa, М., 1950, p 23-37. «Pishchepromizdat», 1955, vyp. 15.
3. Birkgan Yu.B. Tsentrifugi, ikh rabota, konstruktsiya i raschet. М., Gosmashizdat, 1937.
4. Borisoglebskiy B.I. i dr. Tsentrifugi, Katalog-spravochnik. М., Mashgiz, 1965.
5. Goldin E.M. O dvizhenii materialnoy tochki vnutri bystrovrashchayushchegosya konusa. М., izd. AN SSSR, 1955, 3 6.
6. Daishev M.I. O metodike ustanovleniya temperaturnogo rezhima kristallizatsii i fugovki utfelya poslednego produkta. «Sakharnaya promyshlennost», 1966, № 6, p.23.
7. Zuev M.D. Entsiklopediya sveklosakharnogo proizvodstva. tom 4. Kiev, izd. «Sakharotrest», 1926, p. 229-308.

8. Znamenskiy G.M. Teoriya tsentrifugirovaniya utfeley. Trudy KTIPPa, vyp. 10, M., 1950, p 23-37.
9. Ilin M.I., Chudakov G.M., Trofimov V.A., Melnik O.T., Balyura V.A. O rabote Tsentrifugi NVI-L-1000-3 dlya sakhara. «Sakharnaya promyshlennost» 1972. №6. P 11-15.
10. Ilin M.I., Chudakov G.M., Danilin S.V., Obratsov A.E., Malevinskaya N.P., Nakrokhin V.B., Smirnov A.G. razdelenie suspenziy pentaeritrita na nepreryno deystvuyushchey lopastnoy tsentrifuge. «Khimicheskaya promyshlennost», 1974, № 2, p.76-77.
11. Kot Yu.D. Matematicheskie zavisimosti protsessa tsentrifugirovaniya utfeley. Trudy VNIISP, M., «Pishchepromizdat», 1964, vyp. 2, p. 227-237.
12. Saprionov A.R. Tekhnologiya sakharnogo proizvodstva. M.: Kolos, 1998. p. 495.
13. Silin P.M. Tekhnologiya sakhara. Izd. 2, M., izd. «Pishchevaya promyshlennost», 1967, p. 625.
14. Sokolov V.I. Dostizheniya sovetskoy nauchnoy shkoly v oblasti tsentrifugalnoy tekhniki. «Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie».1967., №11, p.20-24.
15. Tombaev N.I. Tsentrifugi pishchevoy promyshlennosti. M., Mashgiz, 1962, p.223.
16. Tereshin B.N. Sovremennye tsentrifugi v sakharnoy promyshlennosti. M., izd. «Pishchevaya promyshlennost», 1975, 120 p.
17. Shkoropad D.E. Tsentrifugi dlya khimicheskoy promyshlennosti. M., izd. «Mashinostroenie», 1975, 248 p.
18. Shlau A.V., Zarubin L.S., Trofimov V.A. Filtruyushchie tsentifugi. M., izd. «nedra», 1956
19. Chudakov G.M., Ilin M.I., Daishev M.I. Av. sv. SSSR № 446316. Byul. izobr. 1974, № 12. Tsentrifuga dlya razdeleniya suspenziy.

20. Yu. Retel, M. Retel. Tsentrifuga nepreryvnogo deystviya s setchatymi lopastyami, vrashchayushchimisya na obshchem gorizontálnom valu. Pat. 1187803 FRG, MKI V 04 V, NKI 82 v, 15. 1961.

DEVELOPMENT OF FILTERING CENTRIFUGES

G.M. CHUDAKOV, M.G. IVANOV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072*

The article presents a literature review with a critical analysis of the stages of development of the theory and practice of design filter center fugues for the separation of inhomogeneous viscous suspensions.

Key words: thin-centrifugation, centrifugation, liquid concentrated suspensions, efficiency centrifugation.