

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ

На правах рукописи

Горный инженер М.А. Б О Р Ц

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
РАСЧЕТ ШНЕКОВЫХ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ,
ПРИМЕНЯЕМЫХ В УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук*

Москва
1958

Подписано к печати 4. VIII. 58г.

Тираж 120 экз.

Отпечатано на ротапринте

в Доме техники

Л №1-07833

Зак. № 592/3393

134519
ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА
А. Н. Киргизской ССР

В В Е Д Е Н И Е

Директивами XX съезда КПСС предусматривается резкое сокращение потерь угля в отходах обогащения, улучшение технологии обогащения угля, освоение и внедрение новых эффективных методов обогащения.

В этой связи Советом Министров СССР намечено сооружение пяти промышленных предприятий для центробежного обогащения высокосернистых коксующихся углей Донбасса, первое из которых — цех центробежного обогащения при Богурьевской ЦОФ, — заканчивается строительством в текущем году.

Основным оборудованием предприятий центробежного обогащения угля являются обогатительные центрифуги, представляющие собой конструктивную модификацию обычных шнековых центрифуг непрерывного действия, широко применяющихся в углеобогатительной промышленности и при гидродобыче угля для обезвоживания угольной мелочи и осветления шламовых вод.

Применение центробежной силы, ускорение которой в современных центрифугах превосходит ускорение силы тяжести в несколько сот раз, интенсифицирует процессы гравитационного отделения угля от породы и выделения угольных частиц из углеводяных суспензий.

За последние годы в литературе опубликовано несколько работ, посвященных шнековым осадительным центрифугам /проф. В. И. Соколова, Г. А. Финкельштейна, Е. М. Гольдина, проф. П. Г. Романкова/.

Важные исследования, относящиеся к изучению механизма центрифугального разделения, выполнены Л. Г. Демидовым и Д. Е. Шлоропадом.

Центрифугирование угольных суспензий подвергнуто теоретическому анализу в статьях Б. С. Каминского и Л. С. Зарубина.

Опыт показывает, однако, что имеющиеся формулы для расчета производительности шнековых осадительных центрифуг, выведенные без предварительных экспериментальных исследований процессов, протекающих в роторе, дают результаты, значительно отличающиеся

от практических. Отсутствует также метод полного технологического расчета центрифуг, используемых в угольной промышленности /т.е. определения выходов и качества продуктов центрифугирования, соответствующих определенной производительности/.

В данной работе сделана попытка восполнить указанные пробелы.

В связи с этим основные задачи, которые мы перед собой поставили, заключались в следующем:

а/ Экспериментальное изучение гидродинамических процессов во вращающемся осадительном роторе, как при обработке суспензий, жидкой фазой которых является вода, так и для случаев обогащения полезных ископаемых, в частности угля, в тяжелых жидкостях, отличных от воды по физическим свойствам /плотность, вязкость/.

б/ Вывод формул для определения производительности шнековых осадительных центрифуг с коническим и цилиндроконическим ротором на основании проделанных экспериментальных работ.

в/ Разработка методов определения качественно-количественных характеристик продуктов, получаемых при центрифугировании на машинах рассматриваемого типа, как при обогащении угля, так и при обработке углеводяных суспензий /полный технологический расчет/.

г/ Проверка полученных уравнений и методов технологического расчета применительно к центрифугам различных типоразмеров /в том числе и на промышленных/ для операций обогащения и обезвоживания угольной мелочи.

Таким образом, диссертация представляет собой совокупность расчетно-теоретических, лабораторно-экспериментальных и опытно-промышленных исследований.

При проведении экспериментальных работ особое внимание было уделено изучению структуры потоков и их гидравлического режима во вращающемся роторе.

Впервые для исследования процесса центрифугирования нами использованы радиоактивные изотопы.

Диссертация содержит шесть разделов:

1. Основные конструкции шнековых осадительных центрифуг и их применение в технологических схемах.

2. Критический обзор имеющихся в литературе методов расчета производительности.

3. Экспериментальные исследования протекания гидродинамических процессов в машинах рассматриваемого типа.

4. Вывод уравнения для расчета производительности шнековых осадительных центрифуг.

5. Экспериментальное определение коэффициента эффективности работы центрифуг и проверка полученных результатов на лабораторных, полупромышленных и промышленных машинах.

6. Разработка методов технологического расчета шнековых центрифуг /т.е. определения выходов и качественной характеристики продуктов центрифугирования/. Сопоставление расчетных и производственных показателей.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ШНЕКОВЫХ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ

Основное условие, принятое для расчета производительности шнековых центрифуг, выражается следующим образом:

$$\tau_c \leq \tau_{cl} \quad /1/,$$

где: τ_c и τ_{cl} - соответственно время, необходимое для осаждения твердой частицы и время ее пребывания в роторе, обусловленное движением потока жидкости.

Вывод любой имеющейся в литературе формулы производительности заключается в отыскании и сравнении величин τ_c и τ_{cl} . При этом надежность полученного уравнения в значительной степени определяется совпадением принятой гидродинамической гипотезы с реальной структурой потока жидкости, проходящего через вращающийся ротор.

Необходимо также правильное применение законов падения тел в жидкой среде.

Часть авторов рассматривает поток жидкости в виде тонкого слоя, проходящего по поверхности имеющегося в роторе несменяемого жидкостного стакана. Осаждение частицы считается обеспеченным, как только она преодолела этот слой. Скорость осаждения твердых частиц под действием центробежной силы определяется в соответствии с законом Стокса.

В результате получается формула:

$$Q = 3,6 \cdot 10^{-3} \frac{\pi D_{сл}^2 \cdot L \cdot (\rho_1 - \rho_2) d^2 \cdot n^2}{3242\mu} \quad /2/$$

где: Q - объемная производительность центрифуги, $м^3/час$;

$D_{сл}$ - диаметр сливного цилиндра, см;

L - длина зоны осаждения, см;

$\rho_1 - \rho_2$ - разность плотностей твердой и жидкой фаз суспензии /т.н. "эффективная" плотность/;

d - диаметр граничного зерна разделения, см;

n - скорость вращения ротора, об/мин;

μ - вязкость жидкой фазы, пуазы

Как видно из выражения /2/, предполагается, что производительность центрифуги не зависит от объема жидкостного стакана ротора, определяясь лишь площадью его сливной поверхности. Геометрические очертания обечайки ротора /например конической или цилиндрической/ также не находят своего отражения в формуле /2/. Формула не рассчитана на угольные суспензии, имеющие, как правило, высокую концентрацию твердой фазы, что приводит к стесненным условиям осаждения материала в роторе.

Кроме того, применение закона Стокса для частиц со сравнительно небольшой эффективной плотностью /какими являются угольные зерна/, подвергающихся воздействию ускорения центробежных сил, весьма ограничено.

Другими авторами предлагается уравнение, основанное на гипотезе о движении одновременно всей жидкости в объеме жидкостного стакана, выталкиваемый как бы под воздействием поршня

$$Q = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot [(\rho_3 - G)^3 + \rho_3^3] \cdot Re \cdot \mu \cdot V}{\left(2 \frac{aG}{\rho_1}\right) \cdot \rho_3^3 \cdot \rho_2 \cdot d \cdot (D_{max} - D_{сл})} \quad м^3/час \quad /3/$$

где: Re - критерий Рейнольдса /для движения частицы/;

V - объем жидкостного стакана ротора, $см^3$;

a - содержание оседающей фракции в исходном угле, в долях единицы /имеется в виду случай обогащения угля в тяжелых жидкостях/;

ρ_1 - средняя плотность фракций тяжелее разделительной среды;

ρ_3 - средняя плотность обогащаемого угля;

G - концентрация твердого материала в исходной суспензии, $т/м^3$;

D_{max} - максимальный диаметр ротора центрифуги, см.

Остальные обозначения прежние.

В соответствии с принятой гипотезой в данном случае производительность пропорциональна объему жидкостного стакана /не будучи связана, однако, с его геометрической формой/.

При использовании уравнения /3/ учитываются некоторые специфические особенности угольных суспензий. Скорость осаждения твердых частиц подсчитывается с помощью универсального метода П.В. Лященко.

Однако, в разных на первый взгляд представлениях о гидродинамическом процессе в роторе, положенных в основу вывода формул /2/ и /3/, имеется много общего.

Во-первых, при выводе уравнения /2/, так же как и /3/, подразумевается, что твердая частица имеет

Одинаковые условия для осаждения по всей длине зоны осаждения.

Во-вторых, уравнениями /2/ и /3/ предполагается наличие только аксиальной составляющей у скорости потока.

В третьих, скорость движения потока в том и в другом случае принимается неизменной по всей его глубине.

Наконец, ни в одном из сравниваемых уравнений не делается попытка отразить ряд гидродинамических факторов негативного порядка, не поддающихся точному количественному учету.

Не случайно поэтому, что обе формулы при подсчетах дают близкие между собой показатели, не совпадающие достаточно хорошо с практическими результатами центрифугирования угольных суспензий.

Кроме представленных выше, в литературе имеются и другие формулы для расчета производительности центрифуг, однако сущность гидродинамических предпосылок, положенных в основу их вывода, совпадает с изложенными и, следовательно, также нуждается в экспериментальной проверке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ШНЕКОВЫХ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ С ПОМОЩЬЮ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ И ФОТОКОЛОРИМЕТРИРОВАНИЯ

В предыдущем разделе было показано, что расчет производительности осадительной центрифуги не может быть произведен без точного представления о структуре и гидравлическом режиме потока во вращающемся роторе. Поэтому первым этапом экспериментальных исследований, выполненных нами в диссертационной работе, явилось изучение протекания гидродинамических процессов в конических и цилиндроконических осадительных роторах центрифуг.

Кинетика вытеснения жидкостного стакана ротора последующими количествами воды, дающая косвенное

представление о структуре водного потока, была исследована методами фотоколориметрии.

К сожалению, метод фотоколориметрирования оказался неприменимым для исследования движения потоков концентрированных водных растворов неорганических солей /азотнокислого и хлористого кальция/, используемых в качестве разделительной среды при центробежном обогащении угля. Все испытанные в процессе работы красители либо не давали истинных растворов в исследуемых жидкостях, либо непрерывно меняли интенсивность окраски во время опыта. Поэтому возникла необходимость в применении иного метода количественного исследования гидродинамики осадительной центрифуги.

Наиболее удобным и точным в данном случае оказался метод "меченых атомов". Учитывая, что обе исследованные тяжелые жидкости представляли собой водные растворы солей кальция, в описываемых ниже опытах был использован радиоактивный изотоп Ca^{45} .

Вращающийся ротор лабораторной конической центрифуги Ш-120^{1/} заполнялся "до перелива" исследуемым раствором соли кальция, в которой заблаговременно добавлялся водный раствор $\text{Ca}^{45}\text{Cl}_2$ в таком количестве, чтобы абсолютная активность его составляла около $80 \mu\text{Ci}$. При этом относительная удельная активность рабочего раствора составляла около 8500 имп/мин.мл.

После заполнения ротора центрифуги активным раствором, в него подавался с определенной объемной скоростью раствор такого же удельного веса и с такой же вязкостью, но не содержащей радиоактивного Ca^{45} . Слив центрифуги тщательно улавливался в приемники, сменяемые через заданные промежутки времени.

Объем всех отдельно собранных порций слива из ротора замерялся, и с помощью радиометрической

1/

Наибольший диаметр ротора лабораторной центрифуги Ш-120 равен 120 мм, наименьший — 75 мм, длина ротора — 120 мм; диаметр сливного цилиндра — 80 мм; рабочий объем ротора — 880 мл.

установки "Б-2" и торцевого счетчика "Т-20" производились определения относительной удельной активности исходного раствора, каждой из отобранных порций слива и раствора, оставшегося в роторе по окончании опыта.

Установлено, что вытеснение радиоактивной жидкости из ротора происходит постепенно, с убывающей скоростью, что подтверждается, например, "кривой вытеснения", полученной для одного из опытов /рис.1/.

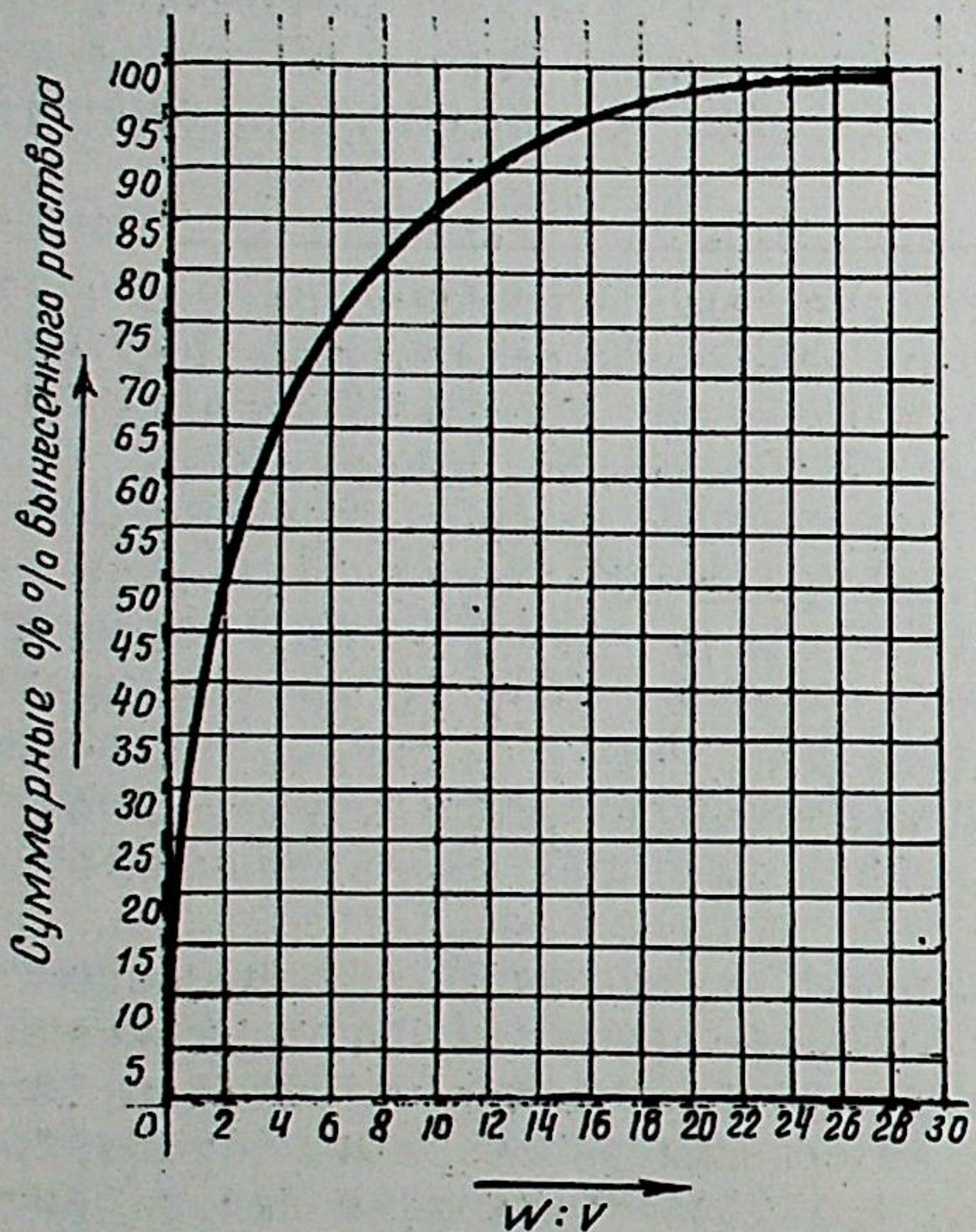


Рис. 1 График вытеснения радиоактивного раствора из ротора центрифуги ЦЛ-120

На оси ординат приведенного графика отложены суммарные проценты вытесненного радиоактивного раствора, считая от начала опыта.

На оси абсцисс — условная производительность, представляющая собой отношение объема жидкости, пропущенной через ротор /W/, к объему жидкостного стакана ротора /V/.

Средние данные по определению влияния различных условий центрифугирования на суммарный процент вытесненного из ротора радиоактивного изотопа Ca^{45} приведены в таблице 1.

Таблица 1

Условия опытов			W : V						Примечание
n об/мин	γ г/см ³	h сантиметры	1	2	3	4	5	6	
980	1,35	5,9	35,1	48,2	55,7	59,6	95,0	98,0	раствор $CaCl_2$
2200	1,35	5,9	30,9	43,5	48,2	55,2	71,0	76,5	раствор $CaCl_2$
980	1,35	3,3	25,0	37,6	45,0	52,5	77,0	83,0	раствор $Ca(NO_3)_2$
980	1,45	5,9	29,1	41,1	48,0	56,0	83,5	93,0	раствор $Ca(NO_3)_2$

Кривые аналогичных очертаний получены при исследованиях водных потоков методами фотоколориметрирования /использовался стандартный колориметр типа ФЭК/.

Таким образом, обе изложенные выше гипотезы в отношении структуры жидкостного потока в роторе не соответствуют данным экспериментальных исследований.

При движении жидкости в тонком слое нарастание количества вытесняемого раствора должно было бы прекратиться в интервале значений W:V от 0 до 1.

При выталкивании одновременно всего жидкостного стакана такой момент должен был наступить в точке, где W:V=1. Обе эти гипотезы не подтвердились.

Дальнейшие исследования с помощью радиоактивного изотопа Ca^{45} показали, что наличие ленточного шнека /имеющегося у обогатительных центрифуг/ практически не изменяет скорости вытеснения раствора из ротора; применение сплошного шнека /обезвоживающие центрифуги/ значительно интенсифицирует этот процесс при сохранении его общей характеристики.

На основании описанных экспериментов было высказано предположение, что элементарные слои жидкостного потока во вращающемся роторе протекают с разной скоростью, убывающей в направлении от оси вращения к обечайке /этим, в частности, объясняется постепенное уменьшение скорости вытеснения радиоактивного раствора из ротора/.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ СТРОБОСКОПИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Определенная часть высказанных предположений в отношении структуры потока нуждалась в дальнейшем подтверждении с помощью методов, позволяющих непосредственно наблюдать и фиксировать поток жидкости во вращающемся роторе. С этой целью нами была сконструирована и построена плоская стробоскопическая модель^{1/}. ротор которой представлен на рис. 2.

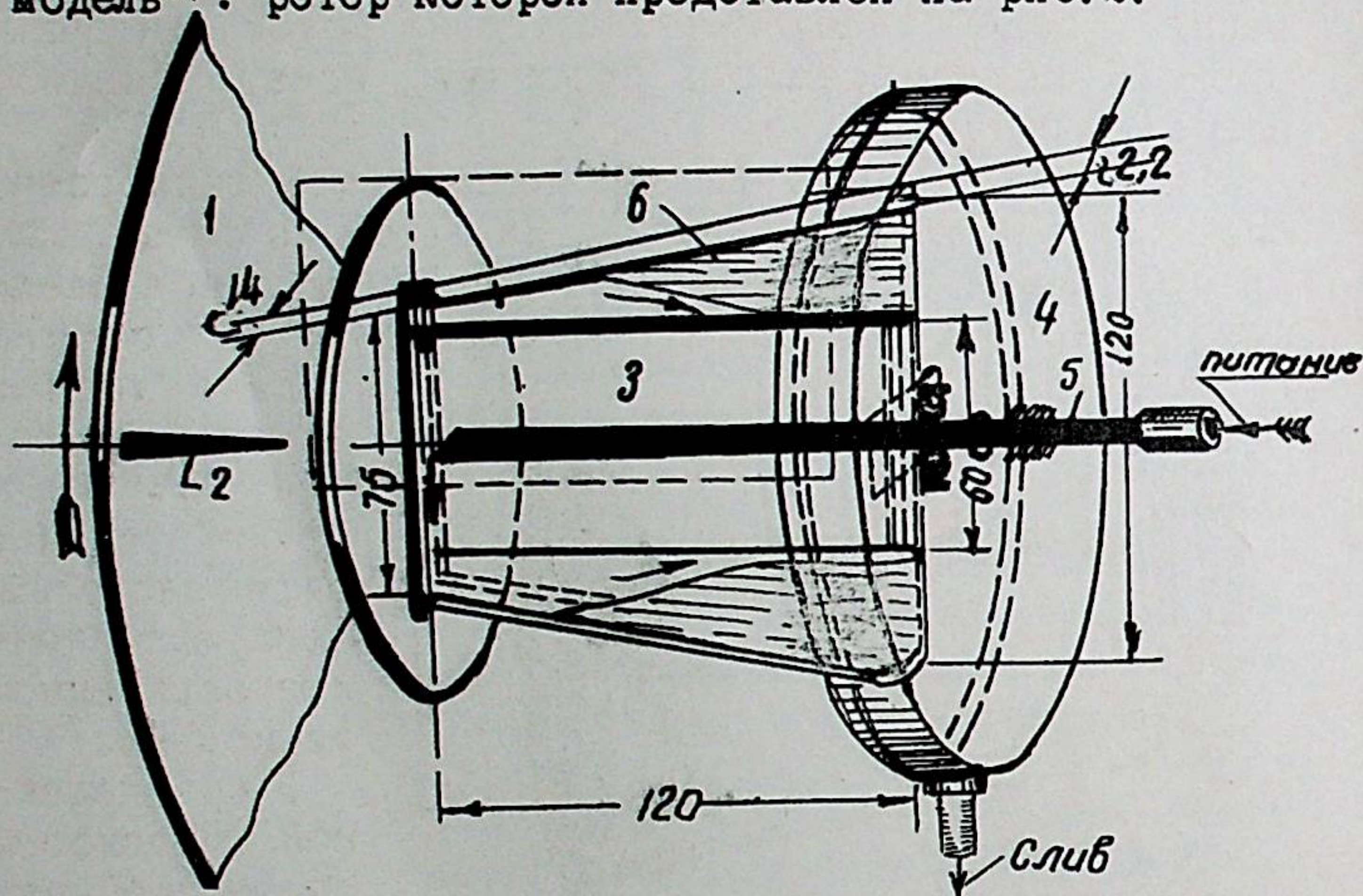


Рис. 2 Ротор стробоскопической модели

По своим геометрическим размерам элементы 6, из которых собран ротор модели, соответствуют аналогичным элементам ротора центрифуги ЦЛ-120. На одной оси с элементами ротора укреплен диск 1 с прорезанной в нем щелью 2, позволяющей наблюдать движущуюся модель 3 как бы в неподвижном состоянии /эффект стробоскопирования/. Число оборотов ротора изменяется путем регулирования напряжения, подводимого к электродвигателю. Жидкость подается при помощи трубки 5 и на выходе из модели улавливается кожухом 4. Примене-

^{1/} Авторское свидетельство № 109282

ние такой модели вполне допустимо, если исследуемая жидкость не очень вязка, а высота и ширина потока не очень малы.

Элементы модели заполнялись исследуемой жидкостью, окрашенной химическим красителем. Затем в них подавались неокрашенная жидкость с тем же удельным весом и вязкостью.

Взаимное расположение окрашенных и бесцветных слоев жидкости позволяло судить о направлении движения потока и об интенсивности замещения жидкостного стакана в зависимости от условий центрифугирования. Воздействие, оказываемое на поток ленточным шнеком, моделировалось порогами, вставляемыми в элементы ротора.

Наиболее характерные моменты опыта фиксировались с помощью фотоаппарата. На одной из фотографий /рис. 3/ виден вращающийся ротор модели с вставленными в него порогами и окрашенные струи потока.

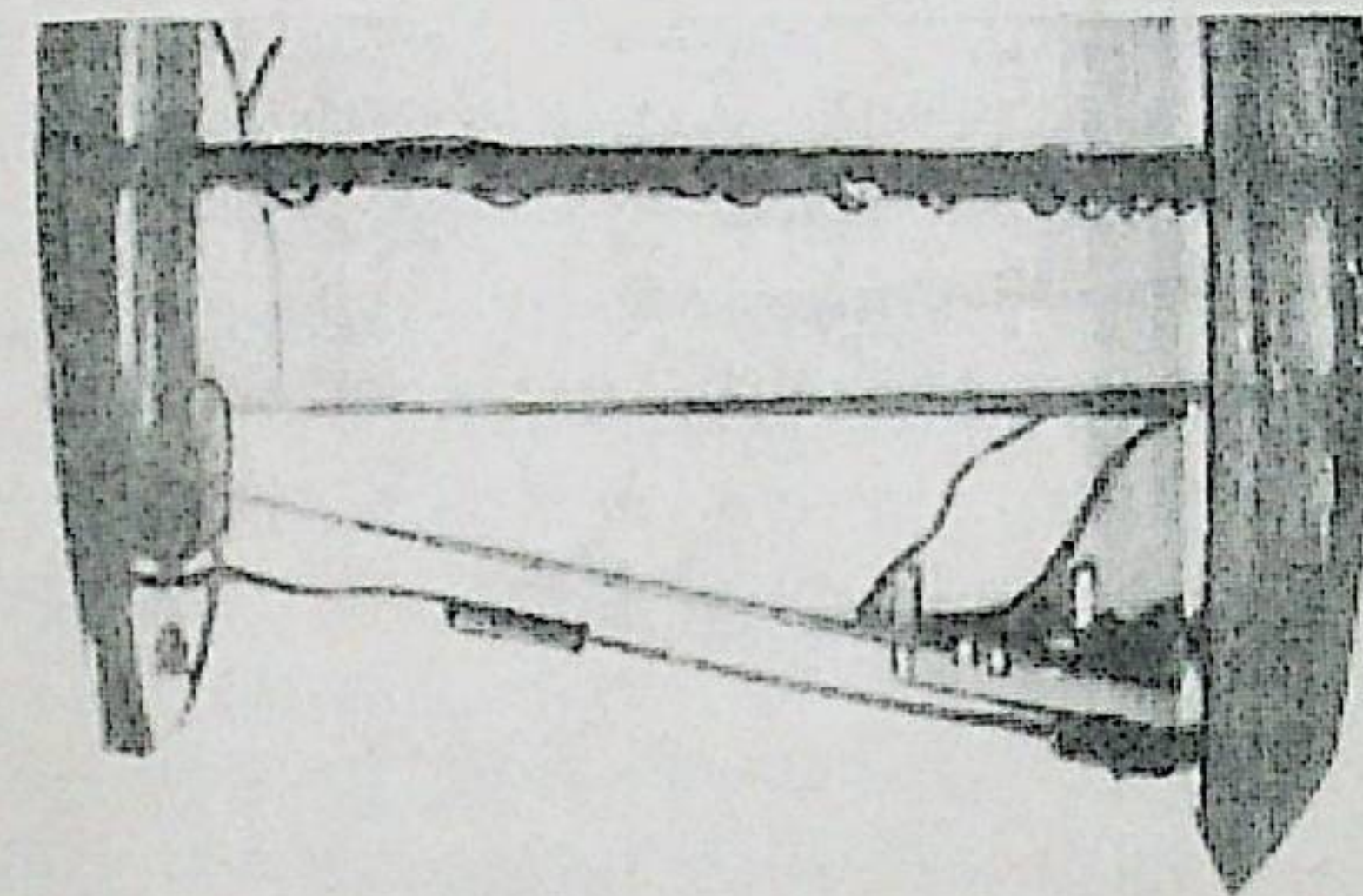


Рис. 3 Фотография вращающегося ротора стробоскопической модели

заканчивающееся сливом избытка жидкости через борт ротора. При движении от места подачи к сливу направление струй потока определяется не только осевой, но и радиальной компонентой. Благодаря такой структуре потока длина зоны осаждения ротора используется не вся, что должно быть учтено при расчете производительности центрифуги. После "перегиба" потока

На участках ротора, наиболее удаленных от оси вращения, видны застойные зоны, заполненные окрашенной жидкостью.

В определенной плоскости "перегиба" направление потока меняется с "нисходящего" на "восходящее",

условия осаждения твердой частицы резко ухудшаются.

Многочисленные фотографии, сделанные при различных условиях работы модели, полностью подтвердили высказанные предположения о структуре потока, как для конической, так и для цилиндрической модификаций роторов. Установлено положение участка "перегиба" потока, что в свою очередь, позволило определить среднюю величину коэффициента использования длины ротора.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКРУЖНОГО СМЕЩЕНИЯ ЖИДКОСТИ В РОТОРЕ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОТОКА И ВЛИЯНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ШНЕКА

Поток жидкости перемещается относительно конического ротора не только в осевом, но, как показали наши опыты, и в окружном направлении. Окружное смещение /отставание/ жидкостного стакана снижает разделительный фактор центрифуги и должно быть учтено при выводе уравнения для расчета ее производительности. С этой целью сконструировано приспособление, позволившее произвести при помощи электрического строботометра многочисленные /несколько сотен/ замеры величин смещения жидкостного потока на разных участках зоны осаждения при различных условиях центрифугирования.

При объемных нагрузках, соответствующих производственным условиям /200-300 м³/м³ жидкостного стакана ротора в час/ величина смещения поверхностных слоев достигает 20% от скорости вращения ротора. В слоях более близких к обечайке окружное смещение потока имеет место в значительно меньшей степени. В среднем для всего жидкостного стакана смещение равно 10% /от скорости вращения ротора/.

Для определения гидравлического режима потока жидкости также, как для исследования его структуры, был использован радиоактивный изотоп кальция.

Установлено, что при обычных производственных условиях в центрифугах имеет место турбулентное дви-

жение потока, что также, как и окружное смещение жидкости, отрицательно сказывается на эффективности работы центрифуг. Лишь в зонах, непосредственно прилегающих к обечайке ротора, сохраняется ламинарный режим. О наличии ламинарного режима свидетельствует например, фотография вращающегося ротора ЦЛ-12С /скорость вращения 1000 об/мин/, показанная на рис.4.

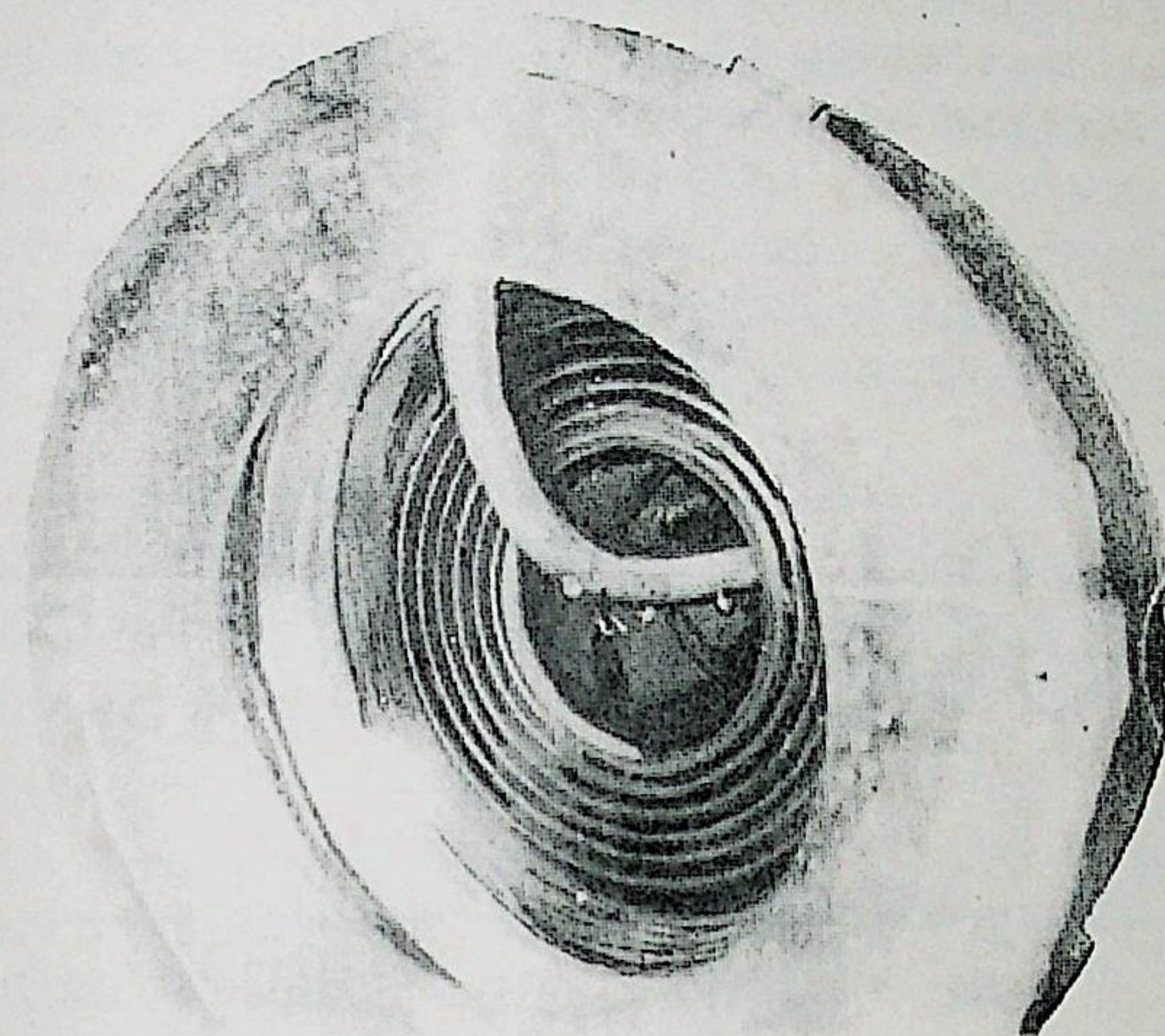


Рис.4 фотография окрашенной элементарной струи во вращающемся роторе

Спиральные темные полосы, выделяющиеся на фоне бесцветной жидкости, заполняющей ротор, представляют собой неразмытые окрашенные элементарные струйки потока, распространяющиеся в области, близкой к конической поверхности обечайки. Спиральная траектория струи свидетельствует также о наличии окружного смещения потока.

Влияние относительного вращения шнека на структуру потока изучено на экспериментальной обогатительной центрифуге с максимальным диаметром цилиндрического ротора 300 мм /горизонтальная шнековая центрифуга, индекс ГШ-3/.

При постановке этих опытов мы исходили из основного предположения, что гидродинамический процесс/а, следовательно, и структура потока/ являются определяющим фактором для показателей работы обогатительной центрифуги, т.е. зыхода и зольности продуктов центрифугирования.

В таблице 2 показаны результаты сравнительных опытов, проведенных при 7 и 35 оборотах шнека в минуту относительно ротора /шнеки промышленных центрифуг делают обычно не более 20-35 относительных оборотов/.

Таблица 2

Результаты первичного обогащения угольной мелочи на центрифуге ГШ-3 при различной относительной скорости вращения транспортирующего шнека.

Условия опытов			Результаты первичного обогащения			
Производит. по исходу углю кг/час	Число оборотов ротора в минуту	Относительн. число оборотов шнека в мин.	Грубый концентрат		осевшая фракция	
			выход %	зольн. %	выход %	зольн. %
580	1860	7	65,2	8,0	34,8	52,4
580	1860	35	65,6	8,1	34,4	51,6

Показатели получены практически одинаковые. Следовательно, не только наличие ленточного шнека, но и величина его относительного вращения не сказываются заметным образом на протекании процесса осадительного центрифугирования. Как показали специальные опыты, лишь при повышении относительного числа оборотов шнека до 135 наступает некоторое ухудшение в работе центрифуги. Однако отставание или опережение шнека редко превышает 2-3% скорости ротора, т.е. при общем числе оборотов ротора в промышленной центрифуге 900-1000 в мин. относительная скорость вращения шнека - не более 18-30 об/мин.

В итоге экспериментального изучения динамики процесса движения жидкости в осадительных центрифугах с коническим и цилиндроконическим ротором установлена структура проходящего через них потока жидкости и определен его гидравлический режим. Исследовано окружное смещение жидкости на различных участках зоны разделения ротора. Полученные сведения позволяют полнее отразить физическую картину процесса, что является необходимым при правильном решении довольно сложной задачи - вывода уравнения для расчета производительности шнековых центрифуг.

ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШНЕКОВЫХ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ

На основании экспериментов нами принята упрощенная расчетная схема движения потока в роторе, показанная на рис. 5

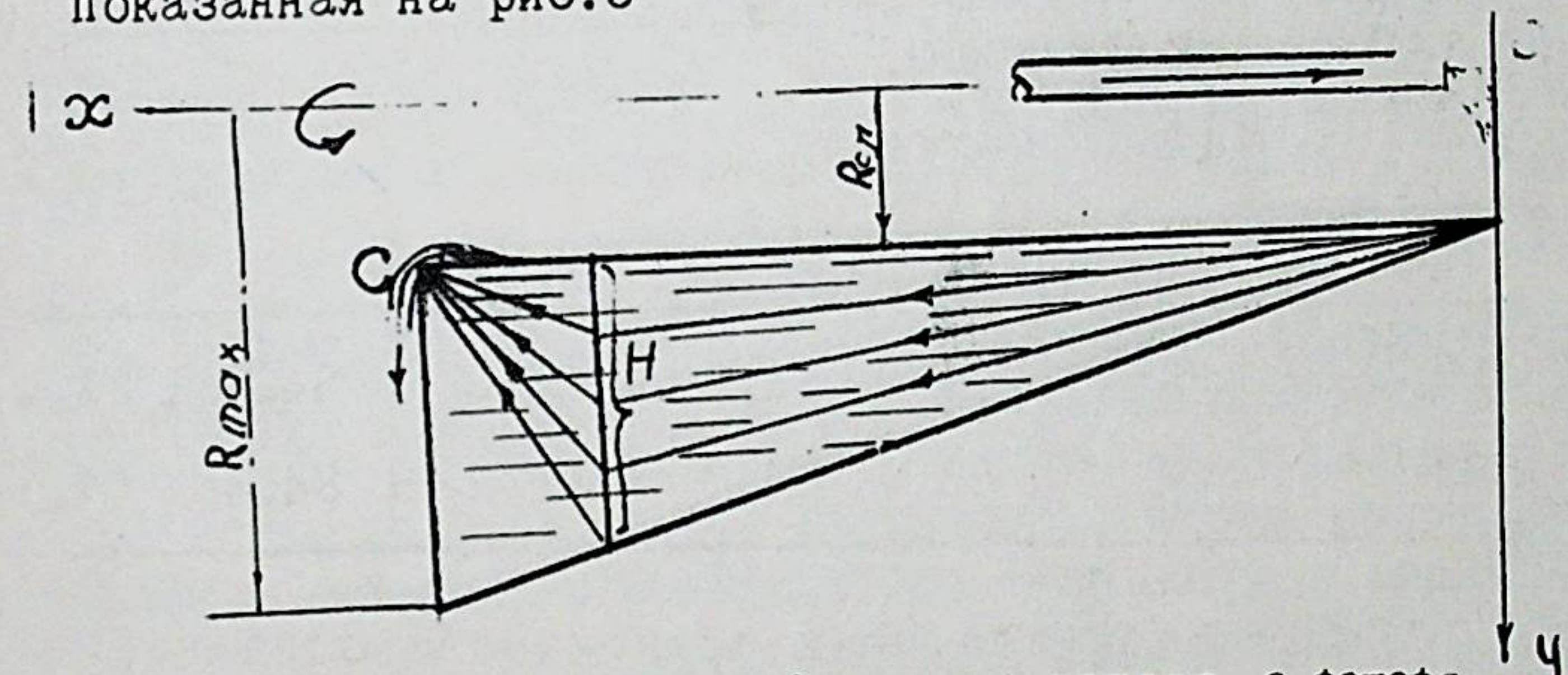


Рис. 5 Расчетная схема движения потока в роторе.

Основной поток в роторе разделен на две части: нисходящую - от места подачи суспензии в ротор до некоторой плоскости "перегиба" и восходящую - от плоскости "перегиба" до слива через борт.

На каждом участке траектории движения элементарных струй условно изображены прямыми линиями. Описанные выше исследования показали, что скорость движения струй потока уменьшается по мере удаления от поверхности слива. Это явление при выводе уравнения для расчета производительности учтено тем, что при

переходе к объемной модели ротора одинаковым площадям его осевого сечения на плоскости xu соответствуют тем большие объемы, чем ближе эти площади к стенке ротора. В формуле также нашло свое отражение изменение условий осаждения твердой частицы после прохождения плоскости "перегиба" потока. При составлении системы дифференциальных уравнений, характеризующих траекторию осаждения твердой частицы, нами принято во внимание, что перемещение последней в радиальном направлении происходит не только благодаря центробежной силе и разности удельных весов, но также под воздействием скорости потока, складывающейся не из одной осевой /как это обычно считают/, но как показали наши исследования, и из радиальной компоненты.

Учтены особенности, характерные для угольных суспензий: высокие концентрации твердой фазы, имеющей малую эффективную плотность; наличие частиц более легких, чем разделительная среда /для случая обогащения/ и т.д. Для подсчета скоростей осаждения твердых частиц в роторе использован универсальный метод Лященко.

Ряд факторов, не поддающихся пока точному количественному определению /различные колебания в режиме потока и движении частиц при изменениях производительности и скорости вращения ротора, различная плотность частиц отдельных угольных фракций и др./ отражен в уравнении коэффициентом эффективности η .

Полученная формула имеет вид:

$$Q = \frac{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot \eta \cdot \mu \cdot Re [(p_1 - G)^3 + p_3^3] \cdot V}{X^2 [2D_{cl} + b(D_{max} - D_{cl})] \cdot d \cdot p_2 \cdot p_3^3 \left(2 - \frac{aG}{p_1}\right)} \text{ м}^3/\text{час} \quad /4/$$

где численное значение параметра Re определяется с помощью критерия Лященко, преобразованного для принятой нами структуры потока в центробежном поле:

$$\psi Re^2 = \frac{(p_1 - p_2) p_2 [2D_{cl} + b(D_{max} - D_{cl})] n^2 \cdot d^3}{694 \mu^2} \quad /5/$$

В формулах /4/ и /5/ приняты прежние обозначения. Дополнительно введены величины:

X - комплексный безразмерный параметр, связанный с конструктивными и технологическими характеристиками процесса осаждения. Значение X должно быть выбрано таким, чтобы обеспечить осаждение частицы до участка, начиная с которого поток совершает восходящее движение к сливу и на котором глубина потока принимается равной H . Численная величина X определяется по таблицам для интеграла вероятности с помощью выражения

$$\frac{H}{R_{cl} \sqrt{\pi}}$$

Положение указанного участка в свою очередь определяется коэффициентом использования длины ротора b , средняя величина которого определена нами экспериментально.

Коэффициент эффективности работы центрифуги η является функцией ряда характеристик процесса центрифугирования. Анализ с помощью теории размерности дает общую зависимость:

$$\eta = \psi (Re_i, Fr_i, \lambda) \quad /6/$$

где Re_i и Fr_i -соответственно критерии Рейнольдса и Фруда, характеризующие гидравлический режим потока во вращающемся роторе.

λ - симплекс Архимеда, представляющий собою отношение эффективной плотности твердых частиц к плотности жидкой фазы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для получения конкретных значений зависимости /5/ проведены опыты по центрифугированию угольных суспензий на 4-х типоразмерах осадительных машин с коническим и цилиндроконическим роторами.

Использованы центрифуги: лабораторная ЦЛ-120, экспериментальная ГШ-3 /горизонтальная шнековая, $D_{max} = 300$ мм/, полупромышленная ГШ-8 / $D_{max} = 800$ мм/ и промышленная ГШ-12 / $D_{max} = 1200$ мм/. Центрифуги типа "ГШ" установлены и эксплуатируются на Жилевской опытно-промышленной обогатительной фабрике института "ВНИИУглеобогатение".

Учитывая, что основной задачей настоящей работы является решение вопросов, связанных с эксплуатацией обогатительных центрифуг, опыты были поставлены в технологически наиболее сложных условиях обогащения угольной мелочи в тяжелых растворах. В ходе этих экспериментов переработано более 1000 т отсева Богураевской ПОФ, являющегося сырьевой базой строящегося в Донбассе первого цеха центробежного обогащения.

Математической обработкой полученных результатов установлена зависимость:

$$\eta = 9,523 Re_i^{-0,1509} \cdot Fr_i^{0,1596} \cdot \lambda^{0,1286} \quad /7/$$

Подсчеты, произведенные по формуле /7/, приведены в табл. 3. С целью упрощения для практических целей могут быть использованы средние значения η .

Таблица 3

Изменения коэффициента эффективности η в зависимости от типоразмеров центрифуг

Тип центрифуг	Диаметр ротора, мм	Значение η			
		$\lambda=9,7$	$\lambda=4,4$	$\lambda=1,25$	среднее
ЦЛ-120	120	0,83	0,75	0,34	0,74
ГШ-3	300	0,56	0,50	0,42	0,49
ГШ-8	800	0,42	0,38	0,32	0,37
ГШ-12	1200	0,38	0,35	0,29	0,34

Рассмотренные выше негативные факторы, учитываемые коэффициентом η , в большей мере сказываются на роторах увеличенных размеров. В первую очередь следует иметь в виду, что промышленные центрифуги работают при повышенных значениях числа Re /зависимость /7/ найдена для наиболее обычных условий работы машин рассматриваемого типа/, и что при возрастании геометрических размеров ротора окружное смещение жидкостного стакана должно быть значительнее.

Некоторые постоянные факторы, снижающие эффективность процесса центрифугирования, учтены числовым коэффициентом в уравнении /4/. К их числу относятся: окружное смещение жидкостного стакана; уменьшение объема ротора за счет наличия застойной зоны, а также за счет значительной массы твердого материала, транспортирующих устройств и т.д. Этим же коэффициентом учитывается несферичность формы угольных частиц, снижающая скорость их осаждения в роторе.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ГРАНИЧНЫХ ЗЕРЕН РАЗДЕЛЕНИЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ИСПЫТАНИЙ ЛАБОРАТОРНЫХ, ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРИФУГ

В качестве критерия совпадения теоретических и экспериментальных результатов для проверки выведенного уравнения принят диаметр граничного зерна разделения d_{gr} . При этом необходимо учитывать, что уголь представляет собою смесь зерен полиминерального состава, удельный вес ρ , следовательно, и эффективная плотность / которых колеблется в довольно широком диапазоне. Использование средней эффективной плотности в данном случае привело бы к большим погрешностям.

Для получения более точных данных исследуемый материал /твердая фракция в сливе шнековой центрифуги/ расслаивался с помощью пробирочной центрифуги на ряд фракций, выделяемых в сравнительно узком интервале удельных весов $\rho_1^1, \rho_1^2, \rho_1^3$ и т.д.

Пользуясь зависимостями /4/, /5/ и /7/ мы произвели сопоставление расчетных величин граничных зерен разделения d_{1p} для определенных фракций с результатами, полученными на практике. Для сравнения подсчеты проделаны также по уравнению /2/.

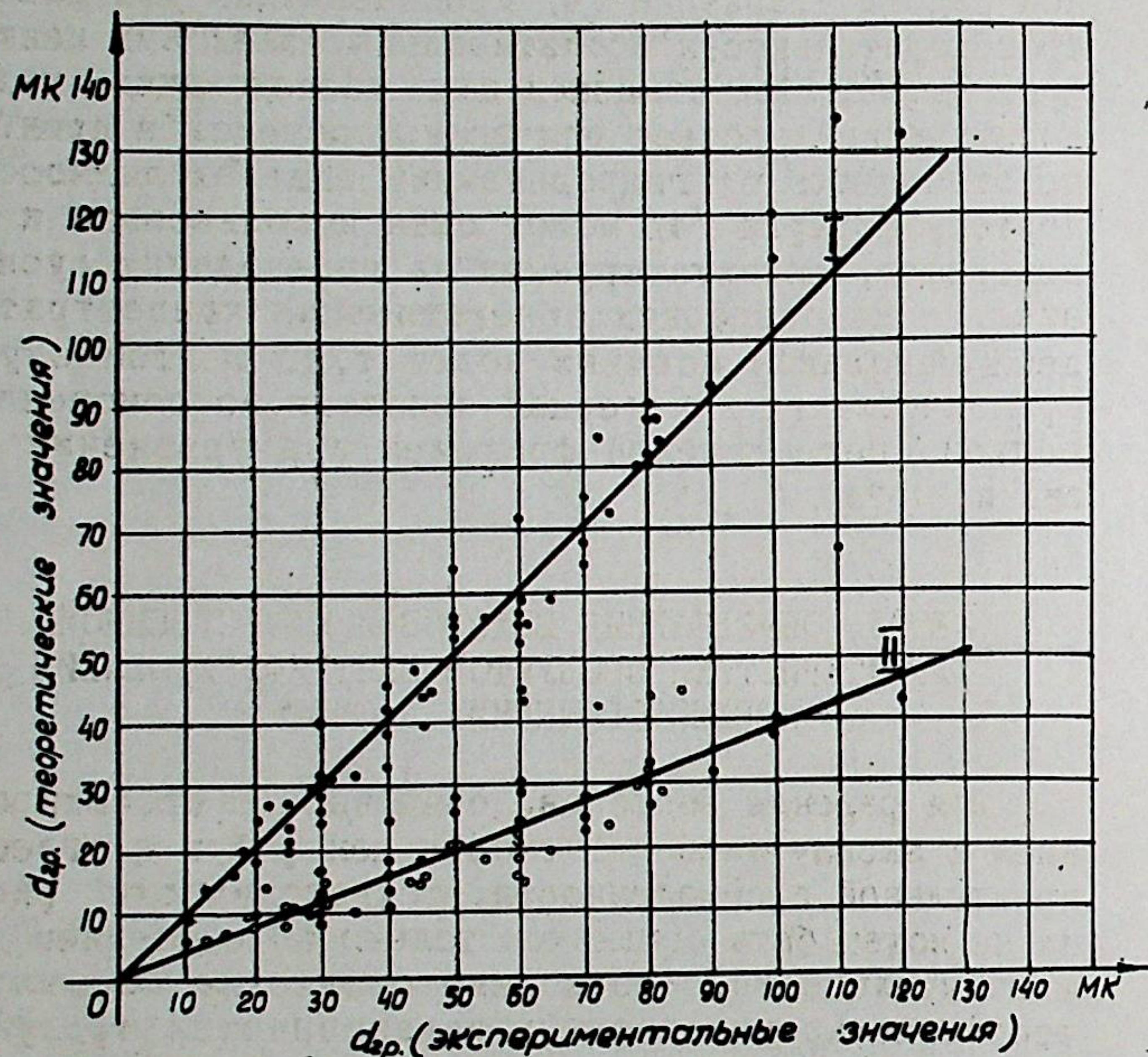


Рис.6 Сопоставление расчетных и экспериментальных величин d_{1p}

На рис.6 показаны две прямые, характеризующие совпадение расчетных и экспериментальных значений для всех четырех типоразмеров центрифуг, испытанных нами. Прямая I получена при использовании для расчетов уравнения /4/, прямая II проведена по точкам, рассчитанным при помощи уравнения /2/. Уравнение /3/ дает результаты, приближающиеся к найденным по

формуле /2/. Угол в 45° , образуемый прямой 1 с осями координат, свидетельствует о том, что выведенное в настоящей работе уравнение вполне выдержало практическую проверку в различных /в том числе и промышленных/ условиях.

В соответствии с основной задачей диссертационной работы уравнение /4/ предназначено для расчета производительности обогатительных шнековых центрифуг. Однако, как показали наши исследования, гидродинамический процесс для водных потоков в принципе не отличается от гидродинамики тяжелых жидкостей. Поэтому формула /4/ может быть использована и для центрифуг, эксплуатируемых на углеводяных суспензиях, - на операциях обезвоживания концентрата, дешламирания моечных вод и т.д. В этом случае практически весь материал является по отношению к водной среде тяжелой фракцией и в уравнении /4/ $a=1$ и $\rho_1=\rho_2$.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДОВ И КАЧЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ /ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ/

Для решения вопросов, связанных с проектированием и эксплуатацией шнековых центрифуг в углеобогатительной промышленности, технологический расчет их не может быть ограничен только определением производительности. Необходимо получение полных качественно-количественных характеристик продуктов центрифугирования. В литературе, посвященной обработке угольных суспензий, этот вопрос не рассматривается.

Первый разработанный нами способ расчета выходов и состава продуктов центробежного обогащения угля основан на определении граничного зерна разделения тяжелой фракции /предполагается, что все легкие фракции попадают в слив центрифуги/ и состоит из следующих операций:

а/ с помощью формул /4/ и /5/ для каждой тяже-

лой угольной фракции в соответствии с фракционным составом исходного угля строятся кривые зависимости "Q-d" и определяются значения граничных зерен разделения, соответствующие заданной производительности. Построение кривых значительно облегчает решение как прямой /определение зависимости Q от d/ так и обратной задачи.

б/ По данным фракционного и ситового анализ исходного угля для каждой тяжелой фракции строятся интегральные кривые зависимостей "γ-d", "A^c-d" и "S₀₀^c-d" /где γ, A^c и S₀₀^c - соответственно выход, зольность и содержание серы/, на которых по имеющимся значениям d_{zр} отыскиваются необходимые технологические показатели. Суммированием последних определяется выход и качество материала в сливе и в осадке.

Использование усредненной величины d_{zр} в качестве определяющего момента для первого способа технологического расчета облегчило проведение на промышленных центрифугах экспериментов, связанных с проверкой выведенного в диссертационной работе уравнения.

Однако, введение в расчет средней величины d_{zр} даже применительно к фракциям со сравнительно узким интервалом удельных весов являлось известным допущением, пригодность которого для полиминерального состава угольных зерен нуждалась в проверке. Такая проверка была выполнена нами с помощью второго способа технологического расчета, основанного на использовании константы, зависящей не только от величины d_{zр}, но и от эффективной плотности угольных зерен.

Второй способ расчета основан на использовании уравнения граничной характеристики материала $\rho_1 - \rho_2/d^2 = \text{Const}$, численное решение которого для конкретного технологического процесса может быть найдено также с помощью формул /4/ и /5/ и графика " $\rho_1 - \rho_2/d^2 - Q$ ". Последовательность дальнейшего расчета такова:

а/ В координатах $\rho_1 - \rho_2/d$ на основании анали -

зов исходного угля наносится соответствующая сетка, каждый прямоугольник которой представляет собою выход зерен определенного класса крупности и определенной эффективной плотности.

б/ В этих же координатах строится кривая $\rho_1 - \rho_2/d^2 = \text{Const}$, являющаяся демаркационной линией, разграничивающей весь материал на направляемый в слив /прямоугольники, расположенные ниже кривой/ и в осадок /прямоугольники - выше кривой/. Примерная кривая $\rho_1 - \rho_2/d^2 = \text{Const}$, построенная к расчету центрифуги УЦМ-1, показана на рис.7

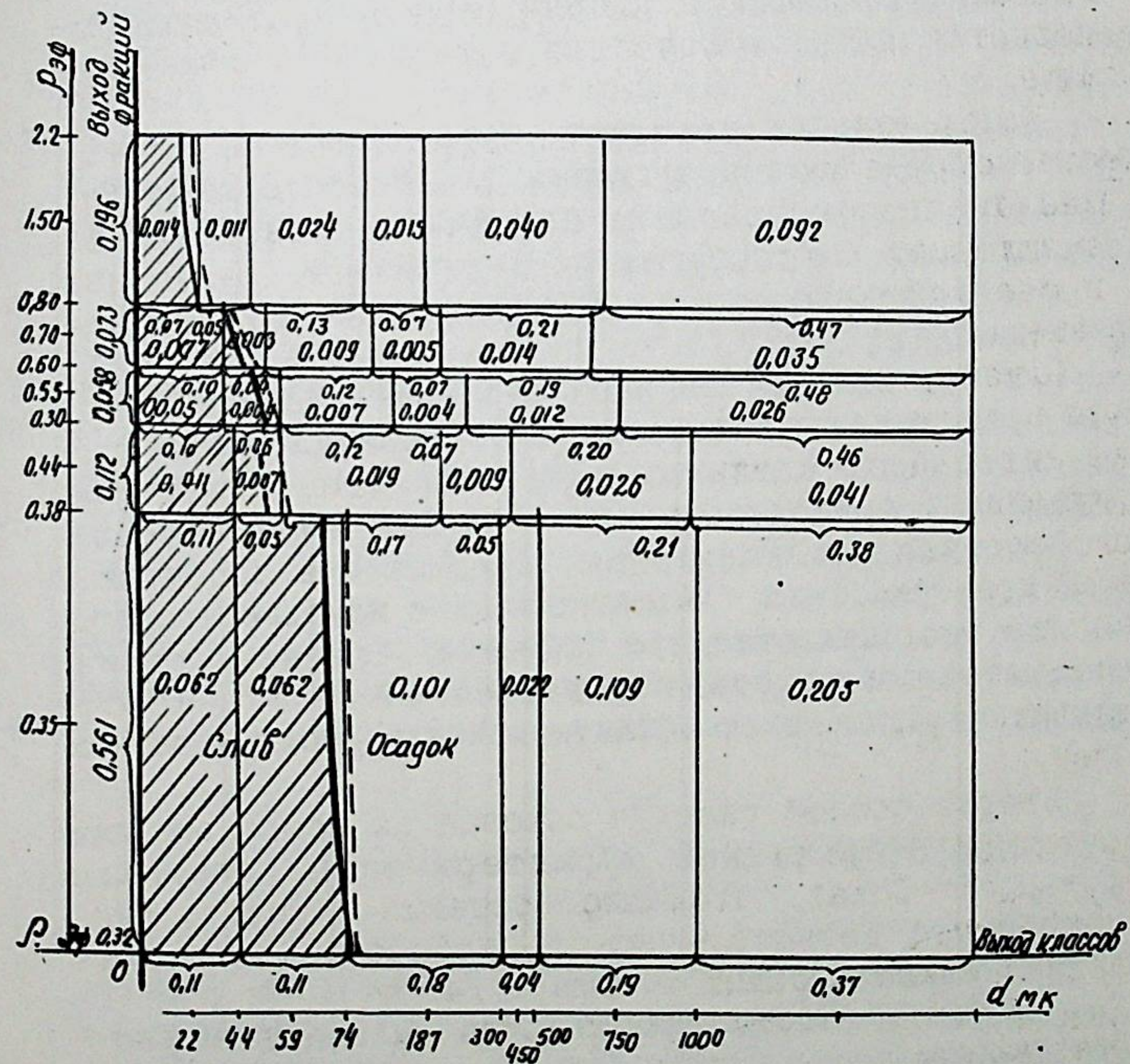


Рис.7 Кривая $\rho_1 - \rho_2/d^2 = \text{Const}$

в/ По интегральным кривым "A^{c-γ}" и "S_{0σ}^{c-γ}" определяется качественная характеристика материала в сливе /концентрат/ и в осадке /порода и промпродукт/.

Рассчитывая центрифуги, эксплуатируемые на углеводяных суспензиях, следует иметь в виду, что по отношению к воде весь исходный уголь является "тяжелым" материалом и поэтому построение кривых Q-d при первом способе и сетки /ρ₁-ρ₂/ -Q при втором способе расчета должно производиться для всех угольных фракций. Сказанное относится и к интегральным кривым выходов и зольностей.

В диссертационной работе показано, что определения, произведенные первым и вторым методами, совпадают и что, следовательно, при выделении угольных фракций в узком интервале удельных весов использование величины граничного зерна разделения в качестве критерия для оценки процесса центрифугирования является достаточно обоснованным.

Достоинства способа, основанного на использовании уравнения /ρ₁-ρ₂/d²=Const, заключается прежде всего в большем его соответствии специфическим особенностям угля, состоящего из зерен различного удельного веса. Кроме того, при такой схеме расчета несколько сокращается объем вычислительной работы.

Приближенный вариант метода, основанного на определении граничной характеристики материала, может быть рекомендован для производственных технологических расчетов осадительных центрифуг в угольной промышленности, как наиболее рациональный.

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА С ПРОМЫШЛЕННЫМИ

Из многочисленных опытов по обогащению угля на центрифуге ГШ-12 /Жилевская фабрика/ и обезвоживанию флотационного концентрата на центрифуге УЦМ-1 /Никитовская ЦОФ "Комсомолец"/ нами подобраны такие условия проведения которых в наибольшей мере соответ-

ствовали бы начальным данным, принятым в примерных расчетах, приводимых в настоящей работе.

Объемная нагрузка на обогатительную центрифугу составляла 65-66 м³/час при соотношении Т:Ж в исходной суспензии равном 1:1,5 и зольности необогащенного угля 22%.

Объемная нагрузка на центрифугу УЦМ-1 равна 62 м/час при Т:Ж в исходной суспензии равном 1:2,6.

Для сравнения технологический расчет выполнен также по уравнению /2/.

Таблица 4

Сопоставление данных технологического расчета с фактическими показателями работы промышленных центрифуг

№ пп	Показатели центрифугирования	Для центрифуги ГШ-12		практические	Для центрифуги УЦМ-1		практические
		расчетные			расчетные	практические	
		по уравнению /2/	по уравнению /4/				
1.	Выход твердого в слив, %	59,5	65,2	65,3	1,0	8,0	7,8
2.	Зольность твердого в сливе, %	5,9	7,2	7,7	-	-	-
3.	Содержание твердого в сливе, г/л	-	-	-	4,3	32,3	31,5

Из таблицы 4 видно, что унос твердого материала в слив /а, следовательно, и содержание твердого в сливе/ центрифуги УЦМ-1, подсчитанный с использованием уравнения /4/, предлагаемого в настоящей работе, почти полностью совпадает с фактическим, чего нельзя сказать о результатах, определяемых формулой /2/. Технологический режим обогатительной центрифуги ГШ-12 также предварительно установлен с достаточной степенью точности лишь на основании уравнения

/4/, которое полнее отражает процесс разделения угольных суспензий в непрерывнодействующих центрифугах осадительного типа с коническим и цилиндрико-коническим ротором.

Относительно большое загрязнение всплывающего в обогатительной центрифуге концентрата зольными частицами в рассматриваемом случае объясняется исключительно трудной обогатимостью отсева Богураевской ЦОФ. На дальнейших стадиях процесса центробежного обогащения даже для таких труднообогатимых углей конечная зольность концентрата снижается до 4-5%.

Таким образом, проверкой уравнения для определения производительности центрифуг, а также методов их полного технологического расчета, основанных на применении этого уравнения, доказана целесообразность использования результатов настоящей работы при проектных и эксплуатационных расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С помощью радиоактивных изотопов, фотоколориметрирования и специально сконструированных моделей центрифуг установлена структура потока жидкости во вращающемся роторе и его гидравлический режим. Исследовано влияние относительного вращения шнека на показатели работы центрифуг. Изучены некоторые факторы, снижающие эффективность работы машин рассматриваемого типа /окружное смещение жидкости и др./.

2. Полученные данные положены в основу вывода формул производительности шнековых осадительных центрифуг с коническим и цилиндрикоконическим ротором.

3. Выведенные уравнения для расчета производительности подвергнуты дальнейшему экспериментальному уточнению и проверке в наиболее сложных технологических условиях, при центробежном обогащении угольной мелочи в тяжелых жидкостях. Для опытов

использовано несколько конструктивных модификаций осадительных центрифуг, /от лабораторной, с диаметром ротора 120 мм, до промышленной, с диаметром ротора 1200 мм / на которых переработаны сотни тонн угольной мелочи.

4. Установлена в критериальной форме зависимость коэффициента эффективности работы центрифуг, входящего в уравнение производительности, от ряда важных параметров процесса центрифугирования и от конструктивных характеристик машин.

5. Сопоставление практических показателей с расчетными показало, что уравнение производительности, выведенное в диссертационной работе, является наиболее рациональным применительно к шнековым осадительным центрифугам, эксплуатируемым в условиях угольной промышленности.

6. Для машин рассматриваемого типа разработаны два метода полного технологического расчета, учитывающие особенности, присущие суспензиям угля в тяжелой жидкости и воде. Расчеты, выполненные с применением указанных методов, обнаружили вполне удовлетворительное совпадение с показателями, полученными на промышленных центрифугах ГШ-12 /обогащение угольной мелочи в тяжелой жидкости/ и УЦМ-1 /обезвоживание и перечистка флотационного концентрата/. Следовательно, предлагаемые способы технологического расчета пригодны, как для обогатительных центрифуг, так и для машин, предназначенных для обработки углеводяных суспензий.

7. Конечные результаты исследований могут быть использованы при технологических расчетах вновь конструируемых центрифуг и производственных операций, на которых центрифуги эксплуатируются, а также для регулирования качественно-количественных показателей работы центрифуг в промышленных условиях.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в статье:

БОРД М.А. Исследование работы и технологический расчет центрифуг, применяемых в угольной промышлен-

ности. Сборник "Обогащение и брикетирование углей"
№ 5, Углетехиздат, 1958.

Кроме того, сообщения о некоторых исследованиях,
входящих в настоящую работу, публиковались нами
ранее в сборнике информации по обогащению и брике-
тированию углей /№ 4, 1957г./, в материалах Все-
союзной конференции по применению радиоактивных
изотопов в народном хозяйстве /1957 г./ и конферен-
ции по гидравлической добыче угля /1957 г./.
