

## КОНСТРУКЦИИ СОВРЕМЕННЫХ УЛЬТРАЦЕНТРИФУГ

*Е. Б. Кофман, Москва*

Неоднократные попытки наблюдения седиментации в высокодисперсных золях при помощи лабораторной центрифуги не дали положительных результатов. Основной причиной этих неудач являются конвекционные токи, которые постоянно возникают в центрифугах вследствие неравномерного нагревания вращаемой жидкости при трении приемников о воздух и трении в подшипниках. Из-за перемешивания скорость оседания оказывается значительно меньше ожидаемой, и нарушение правильной седиментации малых частиц делает невозможными количественные измерения. С возрастанием центробежной силы — даже при неизменных температурных градиентах — конвекционные токи должны усиливаться; на самом же деле при этом усиливается и неравномерность нагревания. Поэтому увеличение скорости вращения центрифуги выше известного предела не имеет смысла, если предварительно тем или иным способом не уничтожена возможность перемешивания.

Ультрацентрифуга, впервые сконструированная Сведбергом для наблюдения седиментации в высокодисперсных золях, представляет собой именно такой прибор, в котором устранена конвекция и благодаря чему становится возможным точно измерять седиментацию при больших скоростях вращения. От обычных центрифуг ультрацентрифуга отличается следующими основными признаками: отсутствием конвекции, весьма мощными и однородными силовыми полями и наличием оптического устройства для измерений во время вращения. Если строго придерживаться первоначального смысла термина «ультрацентрифуга», то из этих трех признаков именно первый является определяющим<sup>1)</sup>; однако, так стали называть все приборы, которые служат для получения высоких скоростей вращения, даже если эти приборы применяются для целей, не имеющих ничего общего с седиментационным анализом. Такие устройства также включены в настоящий обзор, тем более что все они основаны на тех же конструктивных принципах, что и так называемые аналитические ультрацентрифуги.

Все современные ультрацентрифуги можно разделить на две основные группы, отличающиеся друг от друга по идее своей кон-

<sup>1)</sup> Мак Бэйн в своих работах показал, что седиментацию таких белков, как яичный альбумин, можно измерять при умеренных скоростях и без оптического устройства.

струкции: в первую группу входят ультрацентрифуги Сведберга, во вторую — ряд приборов, разработанных в американских лабораториях. За двенадцать лет работы над ультрацентрифугой Сведберг превратил ее к 1935 г. в высокосовершенный прибор, который почти без изменения применяется им и в настоящее время<sup>1</sup>; однако, этот прибор не получил распространения из-за сложности изготовления и высокой стоимости. С 1928 г. в США Бимс<sup>V</sup> и вслед за ним Мак Бэйн стали разрабатывать новый вид ультрацентрифуг, основанный на принципе воздушной струи. Это направление привело к созданию нескольких типов приборов — от простых воздушных волчков Мак Бэйна до наиболее сложных. Последние варианты по совершенству конструкции приближаются к ультрацентрифугам Сведберга. Все же в отношении величины рабочих ускорений и однородности силовых полей машина Сведберга осталась непревзойденной при прецизионных измерениях седиментации.

### УЛЬТРАЦЕНТРИФУГА СВЕДБЕРГА

Как было уже указано выше, своим происхождением эта центрифуга обязана безрезультатности попыток применить простое центрифугирование к исследованию седиментации в коллоидных растворах.

Занимаясь вопросом о распределении размеров частиц золя золота, Сведберг перешел от наблюдений простого оседания под действием тяжести, возможного лишь для частиц размерами свыше 100 м $\mu$ , к работе с центрифугой. После первых неудачных опытов\* он сконструировал в 1923 г., во время своего пребывания в Америке, небольшую центрифугу с оптическим приспособлением для наблюдений во время хода<sup>1</sup>. Этот первый прибор еще ничем существенным не отличался от обычных конструкций. Он представляет собой ротор с электромотором на 20 000 об/мин на вертикальной оси с простым подпятником. Ротор состоит из двух горизонтальных держателей для пробирок, открытых с верхней и нижней сторон; оба плеча уравниваются при помощи шайбочек, как коромысла аналитических весов. Под ротором укреплено горизонтальное зеркало, позволяющее производить фотоснимки пробирок. Центробежное ускорение было порядка 1 000 g. Седиментацию удавалось наблюдать лишь очень недолго, в самом начале опыта: возникавшие потом конвекционные токи нарушали картину. Выяснив, таким образом, решающее значение конвекции, Сведберг в 1923—1924 гг. систематически занимается проблемой ее устранения; опыты ведутся с мелкозернистыми зольями золота в качестве пробного объекта. В 1924 г. опыты эти завершаются полным успехом.

В новом приборе конвекция устраняется следующим образом<sup>2</sup>.

Ячейка, содержащая исследуемый раствор, имеет вид сектора со сторонами, направленными по радиусам ротора; стенки не препятствуют свободному оседанию. Емкость ячейки равна 0,8 см<sup>3</sup>. Для уменьшения внешнего трения и лучшего уравнивания температур ротор вращается в водороде при атмосферном давлении. Подшипники охлаждаются водой. Дiskoобразный массивный ротор радиусом в 45 мм, с низко расположенным центром тяжести, свободно наса-

жен на вертикальную ось так, что, вращаясь, сам выбирает положение равновесия. В этой модели вращение передавалось ротору при помощи зубчатого колеса и бесконечного винта. Ось зубчатого колеса соединялась с валом передачи от электромотора особой пружинной муфтой, благодаря которой ротор обладал свободным ходом и был изолирован от вибраций мотора. Направляющий подшипник оси ротора охлаждался водой, а зубчатая передача — маслом. Верхняя и нижняя стенки ячеек были плоскопараллельны, и луч, направленный снизу через зеркальце, попадал в фотокамеру. Мощность мотора равнялась 1,5 HP, скорость его 5 700 об/мин; скорость ротора не превышала 10 000 об/мин. При помощи этого прибора, создававшего силовые поля с ускорениями до 5 000 g, была измерена седиментация и изучено распределение размеров частиц золя золота вплоть до мельчайших. В 1925 г. при помощи этого же прибора были произведены первые измерения седиментации белка — гемоглобина. Свой инструмент, позволяющий разделить по их величине частицы, недоступные до тех пор исследованию, Сведберг назвал ультрацентрифугой по аналогии с ультрамикроскопом и ультрафильтром, которые дают возможность наблюдать и отделять частицы, не видимые в обычный микроскоп и проходящие через обычные фильтры.

В 1926 г. Сведберг сконструировал свою первую машину более мощного типа — быстроходную ультрацентрифугу, дававшую поля в 100 000 g при скоростях в 45 000 об/мин и радиусе ротора в 52 мм.<sup>3\*</sup> Массивный стальной ротор установлен горизонтально на обычных подшипниках скольжения и приводится во вращение масляными турбинами. Масло подается компрессором с мотором в 15 HP. Подшипники, полый вал ротора и кожух охлаждаются током масла. По конструкции машина близка к современному, окончательному варианту, поэтому детального описания ее не приводим. В последующих конструкциях достигались все возрастающие величины ускорений. В 1931 г. было достигнуто ускорение в 200 000 g при радиусе в 65 мм и рабочей скорости в 54 000 об/мин. Высота столба жидкости 12 мм, максимальная скорость 140 000 об/мин. В 1933 г. та же машина дала ускорение в 400 000 g. Для дальнейшего увеличения интенсивности силового поля пришлось уменьшить размеры ротора, пожертвовав, таким образом, однородностью силового поля и точностью измерений. В 1934 г. были получены поля в 900 000 g, но роторы при таких скоростях разрывались после нескольких экспериментов. В 1935 г. работа постоянно велась с полями в 130 000—710 000 об/мин.<sup>4</sup> По мнению Сведберга дальнейшее увеличение интенсивности полей при современных материалах невозможно, если, конечно, не отказаться от точных измерений.

В настоящее время применяются два различных прибора, избранные из ряда экспериментальных конструкций Сведберга<sup>1-IV</sup>. Первый из них предназначен для области ускорений от 500 до 15 000 g (скорости до 20 000 об/мин), второй — для области 15 000—900 000 g (скорости до 150 000 об/мин). Для скоростей первой области применяются шарикоподшипники, дающие достаточно малое нагревание; требуемая мощность двигателя невелика. В конструкции быстроход-

ного типа применены подшипники скольжения с охлаждением. Двигателями служат масляные турбины. Ротор должен иметь механически наиболее выгодную форму и должен быть тщательно уравновешен статически и динамически.

На рис. 1 изображена схема прибора первого типа. Ротор из никелевой стали с ячейкой *C* укреплен на вертикальной оси специального трехфазного мотора *M*; скорость мотора регулируется частотой тока в пределах от 1000 до 18 000 об/мин. Роторы центрифуги и мотора заключены в камеру, через которую пропускается медленный ток водорода под атмосферным давлением. Статор мотора охлаждается водой; камера ротора помещена в термостат *T* с мешалкой, охлаждением, нагревателем и терморегулятором. Статор установлен на специальных резиновых опорах для поглощения вибраций. Ячейка состоит из двух круглых плоскопараллельных пластинок горного хрусталя диаметром в 18 мм и толщиной в 5 мм, которые служат верхней и нижней стенками. Между ними вставлена бакелитовая пластинка с вырезом в виде сектора; края этого выреза образуют боковые стенки и две кюветы. Все три пластинки разделены очень тонкими резиновыми прокладками (0,06 мм) и вставлены в бакелитовую трубку. Все детали вместе вкладываются в трубку из дюралюминия и скрепляются нарезными кольцами из того же металла. Ячейка вставляется

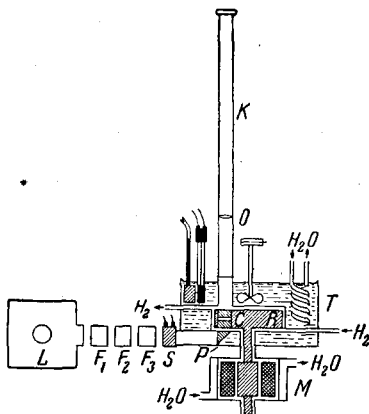


Рис. 1. Схема прибора первого типа

в круглое гнездо ротора. Испарение жидкости в ней предотвращено нанесением на поверхность тонкого слоя парафина. Пучок света от ртутной лампы *L* проходит светофильтры *F*<sub>1</sub>, *F*<sub>2</sub>, *F*<sub>3</sub>, отражается призмой *P* в ячейку и попадает в фотокамеру *K* с длиннофокусным объективом *O*. *S* — электромагнитный затвор. Произведенные во время вращения снимки раствора (в ультрафиолете) фотометрируются, и кривые служат для дальнейших расчетов.

Схему устройства второго типа приводим на рис. 2.

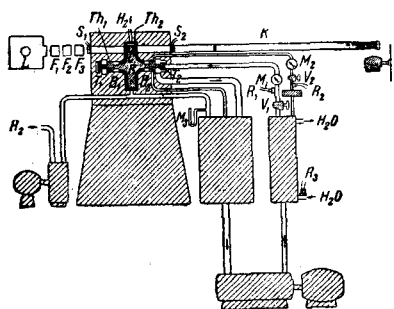


Рис. 2. Схема аппаратуры второго типа

Ротор из хромоникелевой стали опирается на горизонтальные подшипники *B*<sub>1</sub> и *B*<sub>2</sub>; двигателями служат две небольшие масляные турбины *T*<sub>1</sub> и *T*<sub>2</sub> на концах вала ротора. Через окружающее ротор пространство пропускается водород, причем непрерывной откачки

давление его поддерживается равным примерно 25 мм. При этом давлении теплопроводность водорода еще не понижена, трение же незначительно. Существенную роль играет не только давление, но и чистота водорода: примесь нескольких процентов воздуха уже вызывает конвекционные токи в ячейке. Температура в подшипнике и в камере ротора измеряется термоэлементами  $Th_1$  и  $Th_2$ ; температура ячейки при различных скоростях вращения определяется путем наблюдения за плавлением заранее выбранных легкоплавких составов, которые с этой целью помещаются в сосуд. Световой пучок ртутной лампы  $L$  проходит фильтры  $F_1, F_2, F_3$ , ячейку ротора  $C$  и попадает в фотокамеру  $K$ . Снимки производятся при помощи двух электромагнитных затворов  $S_1$  и  $S_2$ . Число оборотов определяется стробоскопически. Масло подается в турбины специально сконструированным компрессором и предварительно охлаждается. Масло для смазки подшипников подается тем же компрессором, тщательно фильтруется, и его давление при помощи вентиля  $V_2$  устанавливается равным  $2 \text{ кг/см}^2$ . Давление масла в турбинах, от которого зависит число оборотов, можно менять в пределах от 0 до  $19 \text{ кг/см}^2$  при помощи вентиля  $V_1$ .

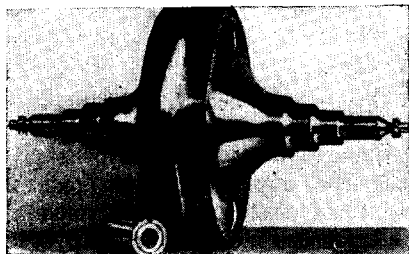


Рис. 3. Ротор второго типа

Для измерения температуры и давления в различных частях аппаратуры служат термометры сопротивления  $R_1, R_2, R_3$  и манометры  $M_1, M_2$  и  $M_3$ . Для предупреждения несчастных случаев при разрывах ротора верхняя и нижняя половины массивного стального статора скреплены винтами из хромоникелевой стали, которые вделаны в бетонный фундамент.

Ротор первого образца 1933 г. (рис. 3) имеет овальную форму с наибольшим диаметром 180 мм. Толщина его у периферии 52 мм, вес 8,9 кг. Расстояние центров отверстий для ячеек от оси ротора (эффективный радиус) равно 65 мм. В части периферии, между отверстиями, для облегчения ротора удалено значительное количество материала, оставлены лишь тонкие ребра. Внешний диаметр ячейки 26 мм, вес ее 56 г. Высота столбика жидкости 12 мм. При скорости этого ротора в 78 000 об/мин появлялось остаточное растяжение в направлении линии, соединяющей гнезда ячеек. Рабочая скорость равна 75 000 об/мин, что соответствует 400 000 g в центрах ячеек; для данных размеров ячеек и ротора — это предел, который можно повысить лишь незначительно, заменив дюралюминий магниевым сплавом.

Для дальнейшего повышения напряженности силового поля приходится уменьшать диаметры ротора и ячеек; однако, требования точности измерений устанавливают предел такому уменьшению. Требования эти следующие: неоднородность силового поля в ячейке не должна превышать 25%; минимальная допустимая высота столбика

жидкости 6 мм<sup>1</sup>). Первым условием определяется расстояние гнезда ячейки от оси около 36 мм (при большом диаметре ротора 102 мм). Второе условие определяет внешний диаметр ячейки — 16 мм. Такой ротор в 1933 г. позволил получать поля в 600 000 g. При предельном уменьшении эффективного радиуса до 32,5 мм в 1935 г., как уже указывалось выше, получены были ускорения в 700 000 g. Однако, Сведберг отмечает, что точность измерений с ротором второго образца неудовлетворительна.

Измерения седиментации позволяют определить молекулярный вес растворенного вещества двумя путями: первый, применяемый в сравнительно небольших силовых полях, — это на-

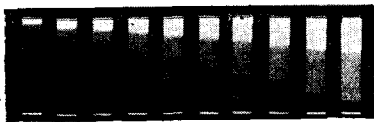


Рис. 4а. Снимки столбика раствора *Limulus*-гемоцианина в ячейке

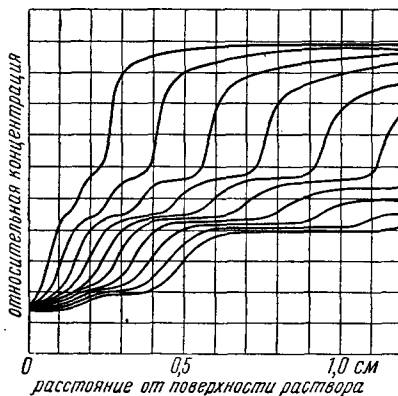


Рис. 4б. Кривые седиментации раствора *Limulus*-гемоцианина

блюдение так называемого «седиментационного равновесия», наступающего при равенстве скоростей процессов седиментации и диффузии; второй способ состоит в измерении скорости седиментации, что возможно лишь в больших силовых полях. Скорость седиментации, отнесенная к единице силового поля и к воде при 20° в качестве растворителя, дает молекулярную константу седиментации  $s$ :

$$s = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{1}{\omega^2 x} \cdot \frac{\eta}{\eta_0} \frac{1 - V\rho_0}{1 - V\rho}$$

где  $V$  — удельный объем растворенного вещества,  $\frac{dx}{dt}$  — скорость седиментации,  $\eta$  — вязкость растворителя,  $\rho$  — плотность растворителя,  $\eta_0$  и  $\rho_0$  — соответствующие величины для воды при 20°. Различие констант седиментации обуславливает разделение растворенной молекулярной смеси.

На рис. 4а приведена серия снимков седиментации *Limulus* — гемоцианина. Обычные промежутки между снимками 5—10 мин. Анализ обнаруживает наличие молекул с четырьмя различными величинами молекулярных весов. На рис. 4б даны кривые седиментации того же раствора. При помощи ультрацентрифуги можно определять молеку-

1) «Разделяющая способность» центрифуги в отношении компонент молекулярной смеси пропорциональна  $\omega^2 XH$ , где  $\omega$  — угловая скорость,  $X$  — эффективный радиус, а  $H$  — высота столбика раствора.

лярные веса высокомолекулярных веществ малой плотности ( $M$  — от 6 000 000 до 1 000), а также молекулярные веса низкомолекулярных веществ с большими плотностями ( $M$  до 200).

### УЛЬТРАЦЕНТРИФУГИ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИНЦИПЕ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ

В течение первых лет после появления быстроходной ультрацентрифуги Сведберг оставался ее монопольным обладателем. Необходимость особо точного уравнивания и центрирования ротора, наличия специальных компрессоров, сложной системы охлаждения — все это делало машину недоступной для других лабораторий. Естественно поэтому, что поиски конструкторов направились в сторону радикального изменения принципа конструкции и прежде всего такого усовершенствования опорных приспособлений, которое позволило бы достигать высоких скоростей без значительного трения и нагрева и с минимальной затратой энергии.

Путь был указан в 1925 г. Анрио и Гюенаром, которые заставили небольшой ротор вращаться в воздушной струе без механического контакта со статором<sup>5</sup>. Известно, что струя воздуха, выходящая из конусообразного углубления, всасывает поднесенный близко шарик и притягивает его к воронке до такого расстояния от ее стенок, при котором это притягивающее действие воздушного потока и вес шарика уравниваются давлением воздуха на шарик снизу. Воздушный волчок Анрио и Гюенара основан на этом принципе. Он представляет собой небольшой цилиндрический ротор с конической нижней поверхностью, на которой имеются радиальные желобки; статором служит металлическая воронка, к стенкам которой подведены прямые трубки, расположенные, как образующие однополюса гиперболоида вращения. Отверстия их на внутренней поверхности воронки приходятся на одном уровне — по кругу. Сжатый воздух, выходя из трубок, образует вихревой воздушный поток. Конусообразный ротор втягивается этим вихрем, уравнивается на расстоянии десятых миллиметра от стенок воронки и начинает вращаться с большой скоростью. Ротор не уравновешен и сам выбирает положение оси вращения. При увеличении давления воздуха скорость возрастает; авторы подчеркивают, что предел ее устанавливается только механической прочностью ротора. При давлении воздуха в  $3 \text{ кг/см}^2$  число оборотов одного образца достигало 11 000 об/сек; медные кольца, положенные на ротор, разрывались. Роторы делались из прочной стали. Экспериментаторы пытались использовать воздушный волчок в качестве центрифуги, однако стабильность его еще оставляла желать многого. При вращении ротор вибрировал, издавая звуковой тон определенной высоты. При очень высоких скоростях он выскакивал из статора.

Вслед за Анрио и Гюенаром воздушный волчок был подробно изучен, главным образом, в США<sup>6, 7, VI</sup>: исследованы условия его устойчивости, аэродинамически наивыгоднейшая форма продольного сечения подводющих каналов, зависимость скорости от их числа, найдены оптимальные углы их осей с горизонтальной плоскостью и углы

горизонтальных проекций осей с радиусами статора. Для наивысших скоростей первые равны  $35^\circ$ , вторые  $65^\circ$ . Оказалось, что можно простыми средствами увеличить устойчивость ротора; одним из таких средств является свободный (или регулируемый) доступ воздуха в нижнюю часть конуса статора через отверстие в нижней точке — вершине этого конуса. При этом прекращается вертикальная вибрация, которая вызывается разрежением воздуха, создающимся между статором и ротором при больших скоростях. Вращение ротора становится тогда настолько устойчивым, что можно резко менять его нагрузку на полной скорости (например, наливая в него жидкость) без нарушения его равновесия.

Ротор может вращать систему, не очень тщательно уравновешенную. Воздушный волчок очень чувствителен ко всякого рода резонансным вибрациям в статоре; для их поглощения статор монтируется на резиновых прокладках. Следует избегать возникновения колебаний в системе, подающей воздух — в клапанах и подводящих трубках, так как такие вибрации через воздушную подушку передаются ротору. Наблюдаются также неперiodические резкие боковые смещения ротора; отчасти они вызываются его несовершенной динамической уравновешенностью и эксцентricностью оси вращения — постепенно возрастая, эта эксцентricность может привести к соприкосновению ротора со статором. Лучше всего поэтому монтировать статор настолько подвижно, чтобы он следовал за горизонтальными смещениями ротора; для этого, кроме гибкости крепления, требуется, чтобы масса статора была меньше массы ротора. При помощи такого устройства Жирар и Шюкри добились прекрасной стабильности роторов, получив скорости в 4 000 об/сек и 6 000 об/сек при соответственных диаметрах роторов в 20 и 13 мм. Центробежные ускорения у периферии ротора — от 600 000 до 1 000 000 g. С увеличением размеров ротора быстро возрастает трение о воздух, а следовательно, и мощность, требуемая для больших скоростей вращения. Кривые зависимости скорости ротора в воздухе от давления движущего воздуха приведены на рис. 5.

Если движущий воздух заменить водородом, то трение уменьшается, а скорость потоков газа увеличивается. Бимс<sup>VI</sup> с ротором диаметром в 9 мм в токе водорода достиг рекордной, приведенной в литературе скорости вращения — 21 600 об/сек, чему соответствует центробежное

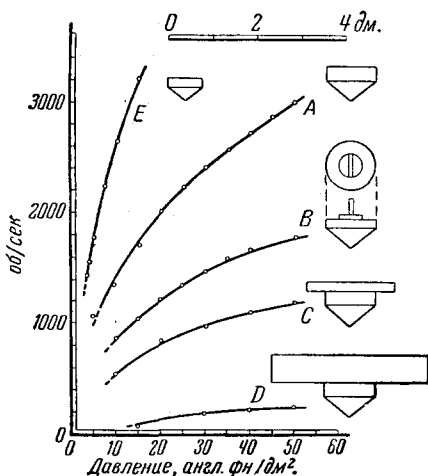


Рис. 5. Кривые А, В, С и D получены с неподвижным статором и роторами, изображенными справа от кривых. Кривая E снята с подвижно укрепленным статором (Бимс)



ускорение, превышающее 8 000 000 *g*. Вращая при помощи ротора небольшие зеркала, Бимс производил снимки электрических искр; при этом удавалось регистрировать промежутки времени порядка  $10^{-9}$  сек.

Дальнейшее усовершенствование воздушного волчка с целью вращения его в прибор для количественных измерений пошло по двум направлениям: Мак Бэйн попытался повысить плавность хода ротора и устранить конвекцию сравнительно простыми средствами, сохраняя неизменной общую схему воздушного волчка; второе направление, представленное Бимсом и его сотрудниками, создало на основе воздушной струи совершенно новую, значительно более сложную конструкцию.

### УЛЬТРАЦЕНТРИФУГИ МАК БЭЙНА

Подробное описание одного из приборов Мак Бэйна появилось в 1935 г.<sup>8</sup>. Чертеж его приведен на рис. 6.

Мак Бэйн обнаружил еще одну причину горизонтальных смещений ротора: турбулентность воздушного потока после выхода из трубок. Чтобы избежать влияния вихрей, он укрепил на статоре три вертикальные, радиально направленные перегородки. Между ними и ротором остается промежуток в 1 *мм*, достаточный для того, чтобы перегородки не влияли на скорость ротора. Благодаря этому приспособлению горизонтальное дрожание при умеренном воздушном давлении незаметно под микроскопом; при высоких давлениях движущего воздуха оно имеет амплитуду в 0,01 *мм*. Неправильное положение статора и засорение трубок воздушной подачи вызывают прецессию ротора. Поэтому статор устанавливается точно по уровню; сжатый воздух пропускается через тонкую сетку. О других условиях устойчивости воздушного волчка уже говорилось; они также предусмотрены в конструкции статора. Для центральной подачи воздуха служит короткая стеклянная трубка, присоединенная к статору посредством отрезка резинового шланга. Длинная трубка или шланг могут быть причиной вибрации. Доступ воздуха регулируется зажимающим шланг винтом. Камера подачи движущего воздуха укреплена на очень длинной металлической подводящей трубке. Трубка эта проведена вертикально и внизу выведена к центральной оси прибора; благодаря этому система статора обладает большой гибкостью и подвижностью в горизонтальной плоскости. Камера окружена прокладкой из резиновой губки. Для устранения конвекции Мак Бэйн регулирует температуру воздуха, окружающего ротор. Если воздух в камере будет оставаться при комнатной температуре, то у верха ротора температура окажется на 5° выше, чем в полости конуса, температура же статора будет на 2° ниже, чем в полости: воздушные струи, выходя из отверстия, охлаждаются. При таких условиях седиментация была бы невозможна; поэтому движущий воздух пропускается через большой медный змеевик, погруженный в нагревающий водяной термостат. Ротор защищен сверху от токов комнатного воздуха металлической, изолированной асбестом крышкой, которая надевается на кожух. Подача высокого давления термически изолирована от кожуха

и станины при помощи бакелитовой втулки. Вся установка закрыта до самого верха толстым футляром, набитым шерстью. Воздух для центральной подачи засасывается из кожуха. Регулируя температуру термостата и величину движущего давления, удается достичь полного равенства температур сверху и снизу ротора и поддерживать это равенство с точностью, превышающей  $0^{\circ},1$ . Температура стенок ячейки приблизительно определяется при помощи двух термопар: один спай укреплен прямо над центром наружной поверхности ротора, в  $0,5$  мм над ней; второй спай введен в полый конус ротора как можно ближе к центру нижней поверхности; третья термопара введена в статор.

Роторы состоят из двух свинчивающихся частей — верхней цилиндрической, вмещающей ячейку для жидкости, и нижней, имеющей форму усеченного конуса, которая и служит собственно воздушной турбиной. Нижняя часть — полая, и в дне ее имеется отверстие диаметром в  $13$  мм. Через это отверстие во время вращения ротора внутрь полости входит неподвижный перископ с кварцевой призмой на конце. Световой пучок, идущий по оси статора, направляется этой призмой в ячейку. Свет ртутной дуги высокого давления проходит через монохроматор; в остальном оптическая установка не отличается от свердберговской. Зазор между головкой перископа и конусом ротора составляет  $2$  мм. Трубка перископа служит одновременно и для центральной подачи воздуха.

Разработаны два типа верхних роторных цилиндров, несущих ячейки. Первый из них представляет собой стальную навинчивающуюся на нижнюю часть ротора оправу; в нее вставлены два кварцевых диска диаметром  $30$  мм и толщиной в  $2$  мм, образующих верхнюю и нижнюю стенки ячейки. Диски разделены прокладкой, которая служит дном ячейки. Прокладка состоит из каучукового кольца (внешний диаметр  $27$  мм, внутренний  $15$  мм, толщина  $1,1$  мм); на наружный край кольца наложена тонкая полоска резины (от резиновой перчатки) шириной в  $5$  мм. Каучуковое кольцо, в котором сделаны четыре радиальных выреза, вложено в латунное, непосредственно прилегающее к стенке ротора. При вращении ячейки в центрифуге с несколькими каплями жидкости резиновая полоска прижимается к кварцу и латуни и герметически закрывает щели; герметичность улучшается с возрастанием скорости. Кварцевые диски закрыты снаружи двумя стальными дисками диаметром в  $30$  мм и толщиной в  $2$  мм: одним диском сверху, а другим снизу. В каждом из них имеется четыре круглых отверстия диаметром в  $6$  мм, на расстоянии  $9,5$  мм от центра диска; отверстия эти приходятся против четырех вырезов в каучуковом кольце и образуют окошки ячейки. Нижний стальной диск вставляется в ротор с помощью двух шпилек; все детали свинчиваются вместе. Наконец, чтобы избежать трения стальных дисков с окошком о воздух, верхний закрывается кварцевым диском, а нижний — кружком из целлулоида или целлофана. Благодаря стальным дискам предельная скорость, которую выдерживают кварцевые стенки, может быть увеличена на  $30^0/0$ , а центробежное ускорение соответственно этому — более чем на  $70^0/0$ . Если вся поверхность дисков оптически

полировалась, то они выдерживали скорость в 3 000 об/сек (540 000 g). Однако, малейшие царапинки на кварце могут во много раз снизить его прочность: диск, выдержавший скорости в 2 500 об/сек, неожиданно разбивается при 1 700 об/сек. Поэтому предельной скоростью для этих ячеек следует считать 1 500 об/сек. Другой тип устройства для ячеек изображен на рис. 6. Верхняя часть ротора представляет собой стальной цилиндр высотой 8,2 мм, с двумя отверстиями диаметром в 8,6 мм, расположенными на расстоянии в 10 мм от центра ротора. В них вставлены две трубки из монель-металла: одна из них наглухо закрыта и служит для уравнивания, другая несет ячейку. Последняя состоит из семи частей: каучукового кольца с вырезом, двух тонких резиновых полосок, двух кварцевых окошек, латунной шайбы и полого латунного винта; радиальный вырез имеет угол в 6° и длину в 4 мм. Верхнее окошко — конической формы, толщиной в 2 мм. Наружные поверхности ротора, трубки и кварцевого окошка точно подогнаны и образуют одну плоскость. При сборке ячейка сжимается снаружи, а под давлением ее удерживает полый винт. Жидкость вводится в нее через небольшое боковое отверстие и покрывается чистым парафиновым маслом. Этот тип ротора ниже описанного вначале и благодаря уменьшению трения о воздух дает скорости, большие на 17%. Разрывов кварцевых окошек не происходило.

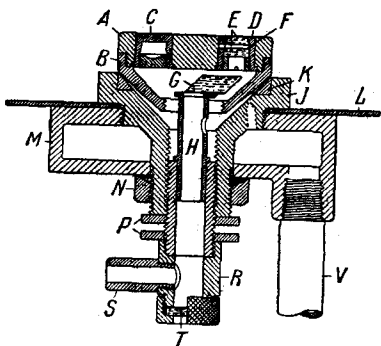


Рис. 6. Детали ротора второго типа, статора и перископа

*A* — держатель ячеек, *B* — конус ротора, *C* — холостая ячейка, *D* — ячейка, *E* — кварцевые диски, *F* — каучуковая прокладка, *G* — призма перископа, *H* — трубка перископа, *J* — статор, *K* — бронзовый вкладыш, *L* — диск, на котором укреплены стабилизирующие перегородки (на чертеже не показаны), *M* — камера высокого давления, *N* — герметизирующая гайка, *P* — упорные гайки, *R* — держатель центральной подачи воздуха, *S* — трубка центральной подачи, *T* — окошко, *V* — подача высокого давления

Материалом для роторов служила хромомарганцевая сталь. Дюралюминий оказался менее пригодным, чем сталь: при прочности, в шесть с лишним раз меньшей, плотность его составляет 0,354 плотности стали. Скорость вращения ротора при постоянном диаметре зависит от скорости вытекания воздуха из отверстий; последняя при увеличении давления воздуха быстро стремится к пределу. Кривая зависимости скорости вытекания от давления показывает, что целесообразно применять давления, превышающие 14 кг/см<sup>2</sup>. Поэтому было сделано все возможное для повышения скорости ротора при постоянном давлении. Скорость можно повысить, уменьшая давление в пространстве, окружающем ротор; однако, при этом усиливается вертикальная вибрация. Для углов конуса статора и конуса ротора выбраны соответственные величины в 100 и 90°.

Чтобы свести к минимуму поверхностное трение, роторы должны быть возможно более низкими и должны иметь хорошо отполированную поверхность. Максимальная достигнутая Мак Бэйном скорость

для ротора диаметром в 37 мм равна 3000 об/сек. Скорость поддерживается постоянной с колебаниями меньше 0,1%. Сжатый воздух от компрессора подается через два баллона с одним редуктором между ними и одним на выходе. Измерения скорости производятся сравнением звукового тона ротора с тоном биений калиброванного контура. Другой способ состоит в получении пульсирующего тока от фотоэлемента, на который падает свет, отражаемый боковой поверхностью ротора, наполовину зачерненной; частота пульсирующего тока сравнивается в телефоне с известной частотой биений.

Описанная центрифуга дала возможность измерить константы седиментации протеинов. Однако, хорошего совпадения с результатами Сведберга не получилось. Среднее значение для яичного альбумина, полученное с ротором Мак Бэйна — О'Сюлливана, равно  $2,98 \cdot 10^{-13}$ , тогда как по Сведбергу оно равно  $3,55 \cdot 10^{-13}$ . По-видимому, несмотря на все усилия, не удалось полностью устранить конвекционные токи. Мак Бэйн поэтому разрабатывает ряд способов механической задержки перемешивания<sup>9, 10</sup>. В 1938 г. им была описана одна из таких конструкций, оказавшаяся наиболее удачной<sup>10</sup>. В ней применяется ротор закрытого типа (рис. 7,а).

Скорость седиментации определяется аналитически, никаких оптических приспособлений не требуется. Верхняя часть А имеет внешний диаметр в 32,5 мм и высоту в 11,5 мм. Внутренний диаметр углубления 28 мм, высота 9 мм. В это углубление вкладывается стопка соединенных между собой горизонтальных круглых пластинок (рис. 7,б).

Таким образом вся ячейка разгораживается на ряд сообщающихся друг с другом отделений. Расстояние между перегородками 0,08 мм. Они не препятствуют оседанию и не влияют на его скорость. Материалом для вкладыша служат монетное серебро, нержавеющая сталь или иридий-платина. Диаметр больших дисков 24,6 мм, толщина 0,102 мм. Диаметр меньших дисков 13,6 мм, толщина 0,076 мм. Вкладыш скрепляется двумя боковыми дисками и вертикальной шпилькой. Измерение скорости седиментации производится анализом проб жидкости, отбираемых из ячейки шприцем. Для этого служат отверстия (в 1 мм<sup>2</sup>) в верхнем и нижнем боковых дисках. Пробы отбираются сперва из «внешнего», неразгороженного объема, который затем опорожняется; «внутренняя» жидкость при этом капиллярно

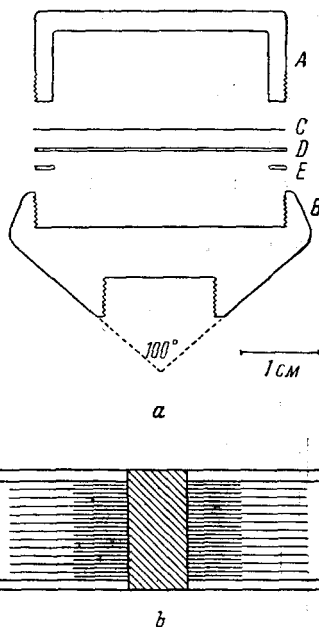


Рис. 7. Разрез ротора закрытого типа (а) и вкладыш к нему (б)

А—крышка, В—конус, С—целлофановый листок, D—металлический кружок, E—металлическая шайба

удерживается между пластинками вкладыша. Затем ротор пускается ненадолго в ход, тогда оставшаяся в отделениях жидкость выдвигается из них, и можно брать пробу для определения концентрации  $s$ . Метод заключается в измерении скорости продвижения границы седиментации между уровнями краев больших и малых дисков; положение этой границы дается формулой

$$x = \sqrt{\frac{b^2 H}{(P + H)}}$$

где  $x$  — положение границы;

$$H = \frac{a^2}{(b^2 - a^2)},$$

где  $a$  и  $b$  — радиусы дисков;

$$P = \frac{c}{c_0},$$

где  $c$  — измеряемая концентрация жидкости, удерживаемой между дисками,  $c_0$  — начальная концентрация жидкости между  $a$  и  $b$ . Число оборотов ротора достигает 2000 об/сек.

Полученное среднее значение константы седиментации для яичного альбумина равно  $3,56 \cdot 10^{-13}$ , тогда как последний результат Сведберга  $s = 3,55 \cdot 10^{-13}$ . Результат для воздушного волчка замечательный, если учесть отсутствие оптического устройства и предельную простоту конструкции.

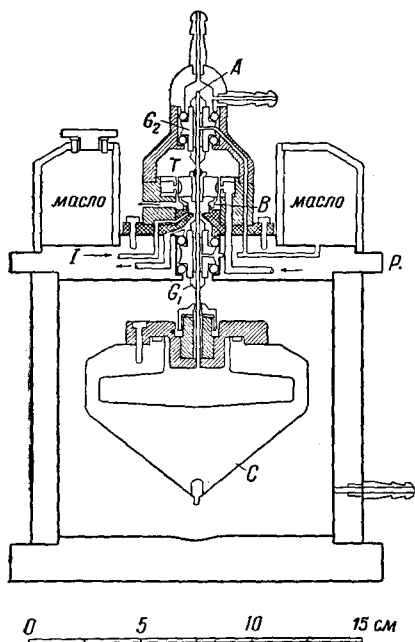


Рис. 8. Вакуумная ультрацентрифуга с ротором для разделения изотопов

Те же обозначения сохраняются для рис. 10

#### УЛЬТРАЦЕНТРИФУГА БИМСА

Для получения с помощью воздушного волчка более однородных силовых полей необходимо значительно увеличивать размеры роторов. С увеличением их диаметра быстро растет трение о воздух и, следовательно, требуемая для вращения мощность, а предельная скорость вращения понижается. Для ротора диаметром в 200 мм предельная скорость — 16 000 об/мин. Бимс решил поместить ротор воздушного волчка в вакуум; это послужило толчком к созданию новой конструкции воздушной ультрацентрифуги V, VI, 11, 12.

Основные особенности этой конструкции следующие. Движущая часть ротора превращена в воздушную турбину и отделена от «рабочей» части, собственно ротора. Последний помещен в вакуумную

камеру и соединен с турбиной гибким валом. Гибкий вал проходит через сальник, герметически запирающий камеру. Наконеч, несущая струя воздуха отделена от движущих струй и регулируется независимо от них; она создает под турбиной воздушную подушку, поддерживающую всю вращающуюся часть прибора. Схема одной из конструкций Бимса<sup>VI</sup> приведена на рис. 8 (см. также фото на рис. 9 и 10).

Вращающиеся части состоят из турбины *T*, гибкого вала *A* и «центрифуги» или ротора *C*. Первоначально для вала употреблялась фортепианная проволока. В данной конструкции он представляет собой гибкую трубку, проходящую через

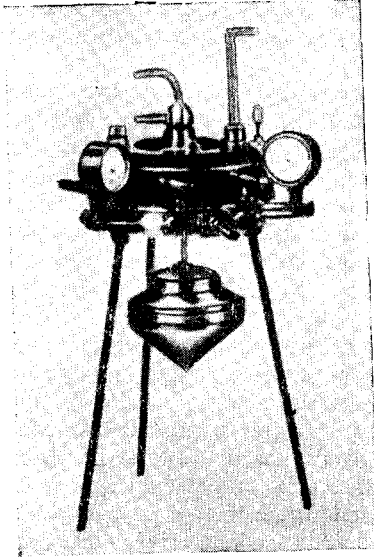


Рис. 9. Снимок прибора, приведенного на рис. 8, с удаленной вакуумной камерой

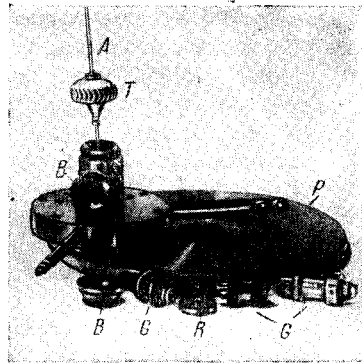


Рис. 10. Снимок турбины, гибкого стержня, кольца воздушной опоры, дюпреновых колец, запирающих сальников и верхней крышки камеры

два герметических сальника  $G_1$  и  $G_2$ .  $G_1$  запирает вакуумную камеру;  $G_2$  дает возможность наполнять ротор во время вращения жидкостью или газом или эвакуировать.

Для изготовления сальника вытачивается латунный стержень, по оси его просверливается канал. В этот канал с обоих концов вставляются пробки из мягкого металла — в них также высверливаются каналы несколько меньшего диаметра, чем *A*, и растачиваются как раз настолько, чтобы стержень скользил в них без усилия. Если стержень стальной, то пробки могут быть из латуни, бронзы или баббита.  $G_1$  и  $G_2$  монтируются на круглых упругих кольцах *R* из дюпрена или другого материала, не подверженного действию минерального масла. Таким образом, сальники обладают известной подвижностью. В них нагнетается по каналам, видимым на чертеже, масло с низкой упругостью паров (для вакуумных насосов). Через такой сальник в эвакуированную камеру за 1 час работы прибора просачивается менее 1 см<sup>3</sup> масла. Устройство обеспечивает достаточную теплоотдачу от сальника к

крышке вакуумной камеры  $P$ . Баббитовые пробки при правильной работе обычно требуется сменять лишь после  $10^9$  оборотов ротора. Вал  $A$  изготавливается из стали, медь-бериллиевого сплава или другого прочного металла. Диаметр турбины зависит от веса и скорости вращения ротора  $C$ ; она изготавливается из дюралюминия, фосфористой бронзы, стали. Воздушная опора создается в пространстве между бакелитовым кольцом  $B$  и нижней поверхностью турбины  $T$ . Если в конструкции не предусматривается второй сальник  $G_2$ , то эта поверхность делается конической. Статор устроен так же, как и в простом воздушном волчке.

Увеличение нагрузки центрифуги настолько незначительно повышает трение в сальниках и трение о воздух, что почти не требует увеличения мощности турбины. Поэтому максимальная скорость, как и у Сведберга, определяется исключительно прочностью ротора. Материалом для ротора служат специальные стали, употребляются также некоторые марки дюралюминия. Вакуумная камера должна выдерживать разрывы роторов — она представляет собой стальной цилиндр и пластинки толщиной по крайней мере в  $2,5$  см. Камера должна быть тщательно термостатирована.

Перед пуском прибора в ход ротор  $C$  закрепляется в нужном положении на валу  $A$ . Затем в канал  $I$  пропускается воздух, и давление (оно имеет порядок  $0,45$  кг/см<sup>2</sup>) увеличивается до тех пор, пока подвижные части не окажутся приподнятыми воздушной опорой. Примерно под таким же давлением подается масло в сальники; камера эвакуируется. Величина вакуума определяется давлением паров масла и достигает  $10^{-6}$  —  $10^{-7}$  мм Hg. Затем пускается в ход турбина. Во время увеличения скорости наблюдаются вибрации ротора, соответствующие частотам упругих колебаний самого прибора, камеры, вала  $A$  и пр. Рабочая скорость должна быть достаточно удалена от этих критических чисел оборотов. Вне их прибор работает настолько плавно, что вращение трудно заметить снаружи. Рабочая скорость равна  $1550$  об/сек и поддерживается давлением в  $0,7$  кг/см<sup>2</sup>.

При скорости в  $1650$  об/сек появляются разрушающие деформации ротора. Для остановки прибора применяются тормозящие, обратные направленные воздушные струи. Скорость измеряется или стробоскопически, или при помощи электромагнитных приспособлений<sup>13, 14, 15</sup>. Наиболее простое из них заключается в следующем<sup>13</sup>.

Измерительное устройство состоит из катушки, концы обмотки которой присоединены к мостику Уитстона. Небольшой магнит, прикрепленный к ротору центрифуги, при вращении индуцирует ток в катушке; частота этого тока измеряется мостиком. В одну из ветвей последнего, кроме омического сопротивления  $R_1$ , включены емкость  $C$  и индукционное сопротивление  $L$ . Мостик может быть уравновешен только при частоте 
$$N = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
. Меняя  $L$  или  $C$  до отсутствия тока в нулевом приборе, можно рассчитать  $N$ . Магнитом служил обрезок швейной иглы в  $1$ — $2$  см длиной. Сопротивления остальных ветвей мостика  $R_2 = R_4 = 300 \Omega$ ;  $R_3 = 100 \Omega$ ;  $R_1 + L = 100 \Omega$ ;  $C$  — слюдяные конденсаторы,  $L$  — переменная самоиндукция. Сходное по прин-

ципу приспособление было предложено и для автоматической регулировки скорости<sup>14</sup>.

На роторе укрепляется намагниченный стальной брусок, расположенный по диаметру. На специальном статоре имеется двухполюсная обмотка, включенная в контур с собственной частотой колебаний, соответствующей нужному числу оборотов ротора. После пуска в ход воздушной турбины ротор стремится вращаться синхронно с колебаниями, возбужденными в обмотке, и сопротивляется дальнейшему увеличению скорости.

При собственной частоте в 1 000 циклов движущее воздушное давление для скорости в 1 000 об/сек равнялось  $2,8 \text{ кг/см}^2$ , для повышения же скорости на 2<sup>0</sup>/<sub>10</sub> требовалось давление в  $6,3 \text{ кг/см}^2$ . Питая контур током извне, можно синхронно вращать ротор электромагнитным способом. Это и было использовано Бимсом и Снодди для «электровакуумной» центрифуги (см. ниже).

Вышеописанный прибор применялся для разделения изотопов путем фракционирования четыреххлористого углерода<sup>v, vi, 17, 18</sup>.

В ротор емкостью в  $65 \text{ см}^3$  наливается  $15 \text{ см}^3 \text{ CCl}_4$ , затем прибор пускается в ход и ротор *C* эвакуируется через полый стержень *A*.  $\text{CCl}_4$  испаряется у периферии приемника, диффундирует к центру против центробежной силы, выходит наружу через *A* и собирается в ловушках с сухим льдом в трех равных фракциях. После тщательной очистки фракции обнаруживают различия в плотности, приблизительно соответствующие ожидаемым на основании теоретических расчетов разделения изотопов в поле центробежной силы. Камера при этом эксперименте не откачивается полностью — в ней оставляется такое количество воздуха ( $10^{-3} \text{ мм Нг}$ ), чтобы при трении развивалась теплота, необходимая для испарения  $\text{CCl}_4$ .

Эта центрифуга дала хорошие результаты в отношении совпадения выхода фракций с теоретическими данными, однако недостатком ее является малая производительность: количество вещества, которое может центрифугироваться одновременно, ограничено емкостью ротора. Для увеличения «пропускной способности» Бимс сконструировал трубчатую ультрацентрифугу<sup>v, 16</sup> (рис. 11).

Вращающиеся части прибора: турбина *T*, трубчатый ротор *R* и гибкие полые стержни  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ .  $S_1$  проходит через масляный запирающий сальник  $G_1$ .  $S_2$  проходит через сальники  $G_2$  и  $G_4$ ,  $S_3$  — через  $G_3$ .  $G_1$  и  $G_2$  запирают вакуумную камеру *V*,  $G_3$  и  $G_4$  позволяют отделять легкую фракцию, выходящую через  $S_2$  от более тяжелой, которая выходит между коаксиальными трубками  $S_2$  и  $S_3$ . Сальник  $G_1$  укреплен на металлическом диске *N*, нижняя поверхность которого приточена к крышке вакуумной камеры. Через трубки *O* нагревается масло под таким давлением, чтобы диск *N* приподнимался и «плавал» на тонком слое масла. Такое герметизирующее устройство необходимо для придания валу достаточной подвижности. Центрифугируемый газ непрерывно поступает в ротор *R* через канал *A*; по мере его продвижения книзу происходит разделение. Легкая фракция направляется вниз через  $S_2$  и собирается в камере *C*; тяжелая вытекает через



промежутков между внутренней стенкой ротора и круглой площадкой дна и далее по каналам  $H$  в пространство между  $S_2$  и  $S_3$  и собирается в камере  $B$ .

Соотношение количеств вещества, собираемых в  $B$  и  $C$ , может регулироваться соответствующими вентилями. Для работы с жидкостями внутрь трубы ротора помещается сплошной стальной цилиндр с радиусом, меньшим радиуса ротора. Вещество при этом вытесняется в пространство с большей величиной центробежной силы, и быстрота разделения возрастает. Высота ротора не ограничена напряжениями, возникающими при вращении, поэтому емкость, а стало быть, и произ-

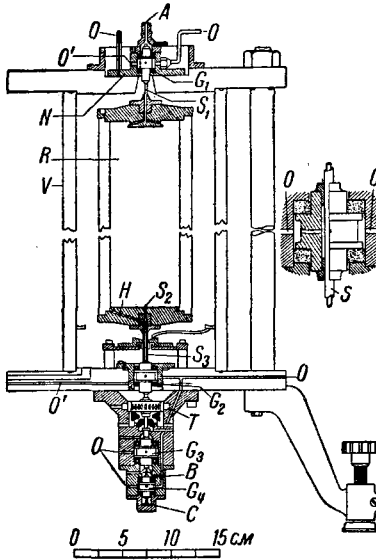


Рис. 11. Схема трубчатой центрифуги

водительность такой центрифуги, может быть чрезвычайно велика. Прибор применялся для разделения газов, смесей с постоянной точкой кипения и высокомолекулярных веществ в растворах. Пар  $\text{CCl}_4$  пренулся со скоростью, соответствовавшей  $2 \text{ см}^3$  жидкого  $\text{CCl}_4$  в 1 час. Однако, выход, в отличие от производительности, оказался хуже, чем в роторах первого типа —  $40\%$  теоретического  $V$ .

Бимс производил опыты разделения газов еще и третьим способом — по принципу отбора скоростей  $V$ ,  $17, 18$ . Ротор с треугольным горизонтальным сечением имел на периферии отверстия, расположенные так, что проникнуть в них могли только те молекулы, скорость которых превышала линейную скорость периферии. Прошедший в

ротор газ выходил по радиальным каналам к полюсу вала и откачивался. Периферическая скорость при обычных температурах значительно превышает среднюю скорость молекул, и, таким образом, наряду с центрифугированием происходит и разделение молекул по скоростям.

Опыты с разделением газовой смеси  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$  дали хорошее совпадение с теорией. Фактор разделения равен

$$\frac{k_0}{k} = e^{\left(\frac{v^2}{RT}\right)(M_2 - M_1)},$$

где  $k_0$  — отношение количества легких изотопов к тяжелым в центре ротора;  $k$  — то же у периферии;  $v$  — периферическая скорость, равная  $8 \cdot 10^4 \text{ см/сек}$ ,  $M_1$  и  $M_2$  — молекулярные веса соответственно легких и тяжелых изотопов. Для  $T = 80^\circ$  и  $M_2 - M_1 = 4$  значение  $\frac{k_0}{k} = 6,9$ . При этой температуре упругость паров многих веществ уже достаточна для центрифугирования в газовой фазе, поэтому сконструирован ротор, работающий при температуре жидкого воздуха  $18$ .

Аналитическая модель ультрацентрифуги Бимса была сконструирована Бауэром и Пиккельсом<sup>19, 20</sup>. Вид ротора для количественных измерений изображен на рис. 12. Из улучшений конструкции можно отметить подвижно укрепленное кольцо воздушной опоры, поглощающее вибрации, приспособление для собирания масла, просачивающегося в камеру, и остроумный способ измерения температуры ротора при помощи чашечки со ртутью, в которую погружается во время вращения стальной наконечник ротора. Чашечка сделана из эбонита, подвижно укреплена на шелковых нитках и закрыта сверху так, что ртуть не выплескивается из нее при вращении.

Стенкой камеры служит цилиндр из хромоникелевой стали толщиной в 7,6 см. Ротор овальной формы с большим диаметром в 185 мм весит 3,430 кг. Ячейка типа Сведберга находится на расстоянии в 65 мм от оси ротора и рассчитана на столбик жидкости высотой в 15 мм. Рабочая скорость 60 000 об/мин, величина ускорения в ячейке—260 000 g. Давление движущего воздуха равно 1,25 кг/см<sup>2</sup>. Материалом ротора служит или легированная сталь, или специальный алюминиевый сплав. Камера откачивается до 10<sup>-3</sup> мм Hg. После нескольких часов работы температура ротора поднимается на 1—2°. При этом конвекционных токов, нарушающих седиментацию, не наблюдается. На рабочей скорости центрифуга вращается настолько плавно, что в чашке, поставленной на пластинку, несущую сальник, поверхность ртути остается совершенно спокойной. Центрифуга останавливается тормозящими обратными воздушными струями. Оптическое устройство не отличается от сведберговского.

Бимсом разработан ряд вариантов основной конструкции: «перевернутая» центрифуга, в которой ротор укреплен на гибком стержне над турбиной и обладает большой подвижностью<sup>VI</sup>; устройство типа трубчатой центрифуги для вращения длинных брусков и стержней с двумя гибкими валами<sup>VI</sup>; центрифуга с горизонтальными подшипниками и гибким валом<sup>12</sup>. В первоначальных конструкциях под ротором имелся стабилизатор, который фиксировал его положение во время вращения<sup>12</sup>.

Кокстоном и Бимсом описана центрифуга с паровым двигателем<sup>21</sup>.

Продолжая совершенствовать механизм центрифуги, Бимс и Сноддн заменили воздушный двигатель электрическим<sup>22, 23</sup>. Место турбины в этом приборе занимает ротор электромотора типа «беличьей клетки»; он приводится в движение током в обмотках статора. Воздушная опора устроена, как обычно, — под ротором. Мотор питается от усилителя для звуковых частот — максимальной мощностью в 300 W. Частота дается биениями от двух пьезоэлектрических генераторов.

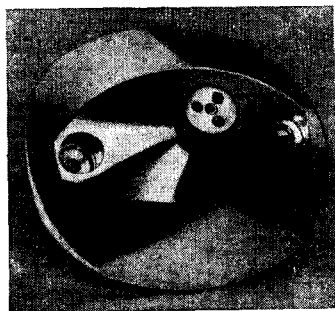


Рис. 12. Ротор «аналитического» типа — Бауэра и Пиккельса

Преимущество электродвигателя заключается в автоматической установке ротора на постоянную скорость. После пуска в ход число оборотов центрифуги постепенно возрастает до тех пор, пока оно не становится практически равным частоте переменного тока в обмотках. Такое равенство осуществляется благодаря тому, что величина трения ничтожна и сводится к трению ротора о воздух. При этом степень постоянства скорости соответствует постоянству частоты контура. Нагревание движущего ротора не влияет на температуру вакуумной камеры, которая регулируется обычным способом.

Применялись различные схемы питающих контуров и другие типы двигателей, в частности, синхронный мотор, дававший 1 400 об/сек. Для скоростей порядка 1 000 об/сек электродвигатель не требует сложного устройства; он избавляет от необходимости воздушной подачи высокого давления и может работать без наблюдения за собой.

В обзоре своих работ<sup>V</sup>, сделанном в конце 1938 г., Бимс сообщил о новом виде опоры для вращающихся частей ультрацентрифуги. Гибкий вал прибора удлинен и выдается над верхним сальником. На стержне у конца его укреплен короткий стальной цилиндр так, что стержень входит в узкий канал, просверленный по оси цилиндра, и незначительно выдается над верхней плоскостью последнего. Непосредственно над концом стержня и коаксиально с ним установлен соленоид, который притягивает стальной цилиндр и таким образом поддерживает всю вращающуюся часть прибора. Конец стержня входит в небольшое углубление на нижней стороне соленоида и упирается в дно этого углубления; при этом между соленоидом и цилиндром остается узкий промежуток. Ток в соленоиде рассчитан так, что цилиндр притягивается с силой, немного превышающей общий вес вращающихся частей; поэтому давление конца стержня на опору очень невелико. При вращении ротора трение смазанного стержня в таком подпятнике меньше, чем трение в сальниках прибора. Магнитные опоры применялись для поддержки роторов весом свыше 1 кг и, повидимому, пригодны и для значительно более тяжелых роторов. Скорости вращения получены такие же, как и с воздушной опорой; заметного торможения из-за токов Фуко не наблюдалось. Таким образом, воздушная ультрацентрифуга превращена в электрическую: комбинация магнитной опоры и электродвигателя дает возможность обойтись без сжатого воздуха. Ток берется от сети в 110 V. Для вращения роторов диаметром в 15 см со скоростью свыше 1 000 об/сек или диаметром в 10 см со скоростью до 1 200 об/сек требовалось лишь 275 W. За 6 час. работы без регулировки центрифуга не дала колебаний скорости.

Еще более совершенный вид магнитного подвеса осуществил Хольмс<sup>24, 25</sup>. Его устройство не нашло пока применения в рабочих моделях ультрацентрифуг. Однако, первые попытки в этом направлении сделаны; кроме того, подвес Хольмса заслуживает внимания еще и потому, что он является успешным завершением ряда усилий экспериментаторов свести к минимуму тормозящий момент трения. Устройство представляет собой помещенную в вакуум магнитную иглу, вертикально висящую без механической опоры в поле соленоида.

Игла находится в положении устойчивого равновесия — в положении с минимумом потенциальной энергии, в котором сила тяжести и сила магнитного поля равны и противоположно направлены. Магнитное поле создается двумя соленоидами, расположенными коаксиально один над другим. Первый, верхний соленоид питается током постоянной силы так, чтобы почти уравновешивать иглу с укрепленным на ней цилиндром. Верхний край цилиндра наполовину загораживает пучок света, падающий на фотоэлемент, который регулирует ток усилителя, питающего второй соленоид. Таким образом равновесие устанавливается автоматически: напряженность поля ослабляется при чересчур высоком положении иглы и увеличивается при слишком низком положении. Демпфирование вертикальных колебаний иглы осуществлялось электромагнитным способом, например, введением в питающий контур второго соленоида соответствующей самоиндукции или емкости.

В опыте с вращением к магнитному стержню длиной 55 мм был прикреплен прочный диск из алюминиевого сплава диаметром в 15 мм и толщиной 5 мм. Диск вместе с иглой весил около 6 г и имел момент инерции 0,8 г/см<sup>2</sup>. Он вращался в эвакуированной камере при давлении 10<sup>-5</sup> мм Hg под действием поля небольшого магнитного бруска, который был укреплен горизонтально под диском вне камеры на воздушной турбинке, вращавшейся со скоростью около 1 500 об/сек. При этом скорость ротора, магнитно подвешенного в вакууме, достигала 1 200 об/сек без нарушений устойчивости. Результаты этих опытов позволяют утверждать, что роторы как малых, так и больших размеров, подвешенные таким способом, могут стабильно вращаться со сколь угодно большими скоростями — вплоть до скоростей разрыва. При скорости в 600 об/сек движущий момент был убран. Наблюдавшееся затем замедление вращения равнялось примерно 2 · 10<sup>-3</sup> об/сек<sup>2</sup>, что соответствует моменту трения около 10<sup>-2</sup> дин·см. Трение обусловлено: 1) остатками газа в камере, 2) токами в диске, вызванными компонентами внешнего магнитного поля, и 3) гистерезисом в магнитном стержне, вызванном теми же компонентами. После сведения этих факторов к минимуму трение может быть еще уменьшено. Была произведена попытка вращать пластинку, подвешенную по Хольмсу, при помощи переменных напряжений, подаваемых на квадранты, укрепленные под пластинкой<sup>26</sup>. Синхронизация такого электростатического мотора достигалась различными способами: один из них заключался в автоматическом управлении напряжениями при помощи прерывания пучка света самой вращающейся пластинкой. Скорость равнялась 3 200 об/сек.

Заканчивая обзор, остановимся на последнем сообщении Мак Бэйна, который в последние годы продолжает улучшать свой «воздушный волчок»<sup>27</sup>. В его защиту Мак Бэйн приводит следующие доводы: дешевизну, легкость термостатирования ротора и, наконец, то, что пуск в ход и остановка отнимают всего несколько секунд времени. Недостатками прибора являются прежде всего значительная неоднородность силового поля (диаметр ротора — 37 мм) и малая высота столбика жидкости — меньше 4 мм. Однако, по-

следняя модель «оптической» центрифуги (декабрь 1939 г.) дала, как утверждает Мак Бэйн, неплохие результаты. От ротора Мак Бэйна — О'Сюливана она отличается лучшей тепловой изоляцией ячейки: на верхнюю часть ротора навинчивается крышка с двумя кварцевыми окошками, которая устраняет трение ячеек о воздух и создает перед ними воздушную прослойку. Ячейки вставлены не прямо в ротор, а во втулку из эбонита толщиной 0,6 мм, и таким образом изолированы от корпуса ротора. Между кварцевыми стенками ячейки вставлена не эбонитовая, а платино-иридиевая пластинка, улучшающая уравнивание температуры в жидкости. Наконец, перископ заменен металлическими зеркальцами, укрепленными на самом роторе в полости его конуса под углом в  $45^\circ$  к оси; дно конической части ротора закрыто кварцевым окошком. При скорости 1900 об/сек и роторении 200 000 г измерения молекулярного веса гемоглобина дали результат, совпадающий с данными Сведберга. Другая разновидность улучшенного ротора (с изолированными ячейками, но с перископом) дала для константы седиментации яичного альбумина среднее значение  $3,64 \cdot 10^{-13}$ , тогда как ротор 1935 г. давал  $2,98 \cdot 10^{-13}$ . (Значение Сведберга —  $3,55 \cdot 10^{-13}$ .)

В той же работе Мак Бэйн сообщает о новом простейшем виде ротора с фоторегистрацией. Это — сплошной металлический конус с насадкой из эбонита, в которой сверху имеется радиальный разрез. В разрезе укреплена простая капиллярная трубка с исследуемой жидкостью; трубка при вращении снимается на фотопленку без применения специальной камеры, затворов и пр. Это устройство дало хорошие значения константы  $s$  для таких белков, как гемоглобин.

## ЛИТЕРАТУРА

### *Сводные статьи и обзоры*

- I. T. Svedberg, Ind. Eng. Chem. Analytic. Ed., **10**, 113, 1938.
  - II. T. Svedberg, Naturwiss., **22**, 1934.
  - III. T. Svedberg, Ber. d. Deutsch. Chem. Gesellsch., **67**, 117 (A), 1934.
  - IV. T. Svedberg, Koll. Z., **67**, 1, 1934.
  - V. J. W. Beams, Rev. Mod. Phys., **10**, 245, 1938.
  - VI. J. W. Beams, J. Appl. Physics, **8**, 795, 1937.
- 
1. T. Svedberg and J. Nichols, J. Am. Chem. Soc., **45**, 2910, 1923.
  2. T. Svedberg and H. Rinde, J. Am. Chem. Soc., **46**, 2677, 1924.
  3. T. Svedberg, J. Phys. et Rad., **2**, 227, 1931.
  4. K. O. Pedersen, Nature, **135**, 1935.
  5. Henriot et Huguenard, C. R., **180**, 1389, 1925.
  6. Girard et Chukri, C. R., **196**, 327, 1933.
  7. Garman, Rev. Sci. Instr., **4**, 450, 1929.
  8. Mc Bain and O'Sullivan, J. Am. Chem. Soc., **57**, 2631, 1935.
  9. Mc Bain and Alvarez-Tostado, Nature, **139**, 1066, 1937.
  10. Mc Bain and F. Leyda, J. Am. Chem. Soc., **60**, 2998, 1938.
  11. J. Beams, Rev. Sci. Instr., **1**, 667, 1930.
  12. J. Beams and E. Pickels, Rev. Sci. Instr., **6**, 299, 1935.
  13. Snoddy and Beams, Science, **85**, 273, 1937.

14. Davis, Rev. Sci. Instr., **7**, 96, 1936.
  15. Shapiro and Butt, Rev. Sci. Instr., **8**, 35, 1937.
  16. J. Beams, Rev. Sci. Instr., **9**, 413, 1938.
  17. Beams and Haynes, Phys. Rev., **50**, 491, 1936.
  18. Beams and Masket, Phys. Rev., **51**, 384 (A), 1937.
  19. J. Bauer and E. Pickels, J. Exp. Med., **65**, 565, 1937.
  20. J. Bauer and E. Pickels, J. Exp. Med., **64**, 503, 1936.
  21. Hoxton and Beams, Phys. Rev., **51**, 690 (A), 1937.
  22. Beams and Snoddy, Science, **85**, 185, 1937.
  23. Black, Beams and Snoddy, Phys. Rev., **53**, 924 (A), 1938.
  24. Holmes, Rev. Sci. Instr., **8**, 444, 1937.
  25. Holmes and Beams, Nature, **140**, 30, 1937.
  26. Smith, Phys. Rev., **53**, 688 (A), 1938.
  27. Mc Bain and Lewis, J. Phys. Chem., **43**, 1197, 1939.
-