

## Устройство и принцип работы диспергаторов со свободно движущимися рабочими телами

**Шаровые мельницы.** Наибольшее распространение получили шаровые мельницы периодического действия, ранее являвшиеся основным типом диспергаторов в цехах эмалей и сохранившие свое значение до настоящего времени при диспергировании грубодисперсных природных пигментов и наполнителей и тонкодисперсных, но труднодиспергируемых пигментов.

Шаровая мельница (рис. 7.1) представляет собой полый футерованный изнутри барабан 1, который закреплен на стойках 10 и частично заполнен свободно движущимися рабочими телами, как правило, сферической формы (шары). Компоненты диспергируемой суспензии загружаются в барабан 1 через люк 3, который после этого герметично закрывается. Барабан приводится во вращение с помощью электродвигателя 7, который через редуктор связан с шестерней,

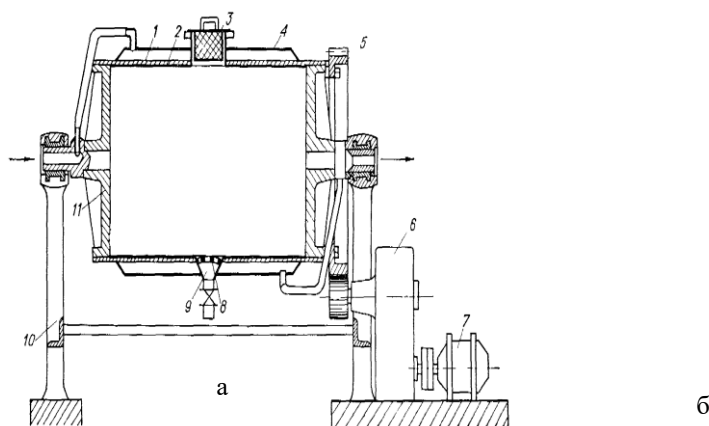


Рис. 7.1. Шаровая мельница (а) и поверхность скатывания шаров (б): 1 – барабан; 2 – футеровка; 3 – загрузочный люк; 4 – рубашка для охлаждения; 5 – зубчатый венец; 6 – редуктор; 7 – электродвигатель; 8 – решетка; 9 – разгрузочный патрубок; 10 – стойки; 11 – днище; L – длина барабана; C – хорда

находящейся в зацеплении с зубчатым венцом 5, закрепленным на барабане 1. Выделяемое в процессе диспергирования тепло отводится путем подачи охлаждающей воды в рубашку 4. После окончания диспергирования барабан останавливают в положении, когда разгрузочный патрубок 9 находится в нижнем положении, и разгружают полученный продукт через решетку 8, задерживающую рабочие тела.

При использовании шаровых мельниц для диспергирования характер

движения рабочих тел близок к лавинообразному режиму, когда верхний слой шаров, скатываясь по неровной поверхности нижележащих слоев, воздействует на перерабатываемый материал раздавливанием и истиранием. Частоту вращения барабана, отвечающую этому режиму, можно рассчитать по формуле

$$n_{вр} = (0,5 \div 0,6) \cdot 42,4 D_6^{-0,5}, \quad (7.1)$$

где  $n_{вр}$  – частота вращения, об/мин;  $D_6$  – внутренний диаметр барабана, м.

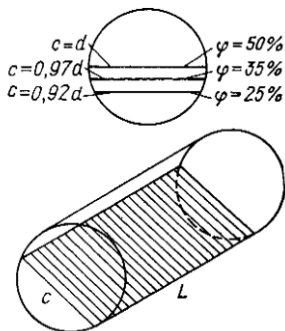
Как было отмечено, с уменьшением диаметра шаров эффективность диспергирования возрастает. Однако диаметр шаров и плотность материала, из которого они изготовлены, должны возрастать с повышением вязкости перерабатываемой суспензии, чтобы не произошло снижения интенсивности движения рабочих тел. В этом случае уменьшение диаметра шаров может привести не к увеличению производительности мельницы, а к обратному эффекту. Для поддержания подвижности рабочих тел при переработке пигментных паст с повышенной вязкостью шары изготавливаются из высоконикелированной или высокохромированной стали или керамических материалов с плотностью не ниже  $3,5 \text{ г/см}^3$ . Неметаллические шары с высокой плотностью можно использовать в мельницах с металлической и керамической футеровкой, а металлические шары – только в мельницах с металлической футеровкой.

При выборе материала для изготовления шаров, помимо плотности, учитываются свойства диспергируемой суспензии. Например, при получении пигментных суспензий белых и светлых колеров, а также когда недопустим примол металла, применяют мельницы с шарами и футеровкой из керамики (фарфора, ультрафарфора, стеатита, уралита и др.). В остальных случаях используют мельницы со стальными шарами.

Опыт эксплуатации шаровых мельниц показал, что их производительность при диспергировании пигментов в пленкообразующих системах, как и следовало ожидать, при лавинообразном режиме движения шаров определяется поверхностью их скатывания. Под

поверхностью скатывания шаров  $F$  понимают произведение длины барабана мельницы  $L$  на длину хорды  $C$ , образуемой ровной поверхностью шаров при данной степени заполнения ими барабана мельницы (рис. 7.2):

$$F = L \cdot C. \quad (7.2)$$



С учетом этого выражения производительность шаровой мельницы  $G$  может быть выражена следующим уравнением:

$$G = AF = A \cdot L \cdot C, \quad (7.3)$$

где  $A$  — коэффициент, зависящий от вида обрабатываемой пигментной суспензии.

Анализ этого уравнения показывает, что с увеличением диаметра барабана  $D_6$  снижается удельная (отнесенная к единице объема) производительность шаровой мельницы, так как величина поверхности скатывания  $F=f(D_6)$ , а объем барабана  $V_6 = f(D_6^3)$ . Поэтому для увеличения производительности следует стремиться к увеличению отношения  $L/D_6$ .

Главные достоинства шаровых мельниц: полная герметизация, исключение необходимости предварительного смешения пигментов с пленкообразующими системами; простота конструкции; малые затраты труда; возможность диспергирования любых пигментов, легкость и простота замены изнашивающихся рабочих тел при диспергировании природных грубодисперсных пигментов и наполнителей, а также абразивных пигментов; полное устранение примесей металла (загрязнения продукта металлом, истираемым со стенок барабана рабочими телами) у мельниц с керамическими шарами и футеровкой; простота обслуживания.

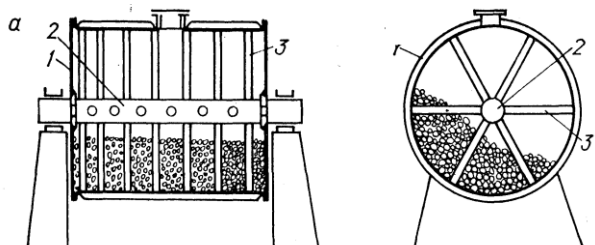
Основные недостатки: трудность очистки при переходе на другую пасту (по цвету или пленкообразователю); сильный шум при работе мельницы; длительность диспергирования (от нескольких часов до десятков часов); низкая объемная производительность; трудность получения суспензий с размерами частиц менее 15 мкм.

Шаровые мельницы являются эффективными аппаратами для диспергирования природных грубодисперсных пигментов и наполнителей и синтетических тонкодисперсных, но труднодиспергируемых пигментов. Они незаменимы, когда недопустима даже ничтожная примесь металлических частиц в получаемом пигментированном материале.

В шаровой мельнице, в связи с отмеченной выше особенностью движения рабочих тел, в процессе диспергирования принимает участие только верхний их слой, следствием чего является низкий коэффициент полезного действия аппарата. Для вовлечения в работу всей массы шаров разработано несколько модификаций диспергаторов этого типа. Наиболее известны из них диспергаторы ЛТИ-1, ЛТИ-2 и атритор.

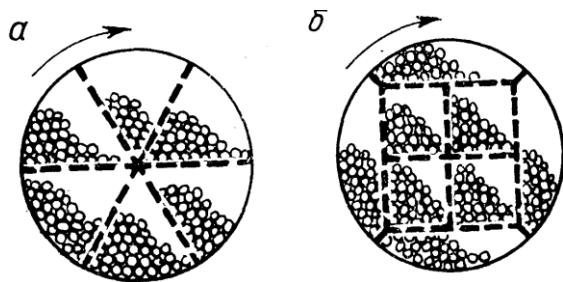
**Диспергатор ЛТИ-1.** Это аппарат периодического действия (рис. 7.3), который представляет собой вращающийся частично заполненный шарами барабан, внутри которого неподвижно по отношению к его стенкам закреплен вал с лопастями. При вращении барабана вся масса рабочих тел вследствие неизбежного омыwania ими лопастей приходит в движение, причем лопасти значительно снижают скольжение шаров по стенке барабана (что в 2-3 раза снижает скорость износа его внутренней футеровки), повышают высоту их подъема и скорость скатывания.

Объемная производительность диспергатора ЛТИ-1 периодического действия в 1,5-2 раза выше, а удельный расход электроэнергии примерно в 2 раза ниже, чем у шаровой мельницы такого же объема; потребляемые электродвигателями мощности одинаковы.



**Диспергатор ЛТИ-2.** Этот диспергатор отличается развитой поверхностью скатывания шаров, что достигается созданием во вращающемся барабане ячеек, образуемых перегородками, которые расположены радиально или по хорде (рис. 7.4) и

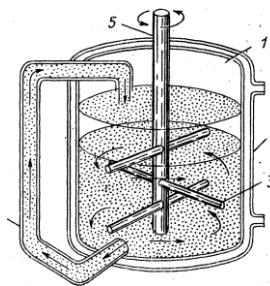
делят барабан на ряд секций-ячеек. Каждая из ячеек барабана частично заполнена рабочими телами. В перегородках имеются небольшие отверстия для перетока суспензии. Производительность диспергатора ЛТИ-2, в отличие от шаровых мельниц и диспергатора ЛТИ-1, значительно возрастает с увеличением степени объемного заполнения барабана шарами и пигментной суспензией. Благодаря высокой степени заполнения барабана пигментной суспензией при использовании диспергатора ЛТИ-2 снижаются затраты труда на операции загрузки исходных компонентов и выгрузки готового продукта.



Достоинства, недостатки и назначение диспергатора ЛТИ-2 и шаровых мельниц аналогичны. Объемная производительность диспергатора ЛТИ-2 гораздо выше, а расход электроэнергии ниже, чем у диспергатора ЛТИ-1 и шаровой мельницы одинакового объема. Необходимо учитывать, что в диспергаторе ЛТИ-2 перегородки изнашиваются с обеих сторон, поэтому их следует изготавливать из износостойких материалов достаточной толщины.

**Атриторы.** Это диспергаторы периодического и непрерывного действия, в которых рабочие сферические тела в смеси с диспергируемой суспензией перемешиваются многолопастной мешалкой. В атриторе периодического действия диспергируют низковязкие суспензии, в атриторе непрерывного действия, имеющем неподвижные лопасти, закрепленные на стенках рабочей камеры, диспергируют суспензии с повышенной вязкостью.

В атриторе периодического действия (рис. 7.5), в вертикально расположенной цилиндрической неподвижной рабочей камере, заполненной смесью сферических рабочих тел с диспергируемой суспензией, вращается многолопастная мешалка. При вращении мешалки возникает интенсивное движение рабочих тел вокруг движущихся лопастей. Диаметр шаров в первых моделях атриторов составлял 12—15 мм, а затем размер сферических рабочих тел уменьшили до 3—9 мм. Их изготавливают из легированной стали, твердого фарфора (стеатита), карбида вольфрама и других износостойких материалов. Вместимость рабочей камеры достигает 1000 дм<sup>3</sup>. Главной особенностью атриторов является конструкция мешалки.



В атриторе конструкции фирмы Netzsch (Германия) стержни мешалки круглые. Они расположены по спирали под углом 60-90° друг к другу. Длина лопастей составляет примерно 0,8 радиуса цилиндрической рабочей

камеры. Материал камеры — легированная или обычная сталь, футерованная стеатитом; материал мешалки — износостойкая сталь, не влияющая на цвет и другие свойства лакокрасочного материала. Камера имеет рубашку для охлаждения ее содержимого, через которую пропускается вода.

С увеличением объема рабочей камеры могут возникнуть застойные зоны для суспензии. Поэтому в аппаратах вместимостью 250 дм<sup>3</sup> и более с помощью насоса и циркуляционной трубы (см. рис. 7.4) создают рециркуляцию суспензии в камере. Кратность рециркуляции высокая — до 15 объемов суспензии, находящейся в камере, в час. Рециркуляция суспензии и ее выгрузка из камеры осуществляется насосом через сетку, задерживающую рабочие тела в камере. Конструкция аппарата предусматривает и возможность поворота его корпуса. Для диспергирования суспензий, содержащих легколетучие органические растворители, предусмотрена герметически уплотняемая крышка камеры.

В атриторе периодического действия длительность диспергирования не ограничивается, поэтому в нем можно диспергировать труднодиспергируемые пигменты (железную лазурь, технический углерод, некоторые органические пигменты) до высокой степени дисперсности. Влияние различных факторов на длительность диспергирования до определенной степени дезагрегации пигментов видно из формулы

$$t = K \cdot d \cdot n \cdot 0,5, \quad (9.1)$$

где  $t$  — время диспергирования;  $d$  — диаметр рабочих тел;  $n$  — число оборотов вала в минуту;  $K$  — константа, зависящая от природы суспензии, мелющих тел и параметров атритора.

Из формулы следует, что на интенсивность процесса диспергирования в атриторах, помимо размера рабочих тел, большое влияние оказывает частота вращения мешалки, которая, в свою очередь, зависит от объема (диаметра) камеры и свойств суспензии. В аппаратах с объемом рабочей камеры до 80 дм<sup>3</sup> частоту вращения вала мешалки, как правило, можно регулировать

бесступенчато (от 50 до 150 об/мин), а в машинах с камерами объемом 250, 400 и 600 дм<sup>3</sup> – ступенчато (70-90-100 об/мин).

Благодаря малым размерам рабочих тел, их интенсивному перемешиванию, большому объемному заполнению камеры смесью рабочих тел с суспензией атриторы периодического действия имеют более высокую объемную производительность и меньший удельный расход электроэнергии, чем шаровые мельницы. Экспериментально подтверждена прямая связь результатов диспергирования с потребляемой мощностью, которая определяется по формуле

$$N = 2\pi nF, \quad (9.2)$$

где  $N$  – потребляемая мощность;  $n$  – число оборотов мешалки в минуту;  $F$  – вращающий момент.

В атриторах диспергируют тонкодисперсные синтетические неорганические и органические пигменты и наполнители. Немикронизированные природные пигменты и наполнители вызывают быстрый износ мешалки.

Атритор непрерывного действия (рис. 7.5) имеет многолопастную мешалку (вал 4 с лопастями 5), а на стенке камеры 1 закреплены так называемые отбойные лопасти 3, благодаря которым исключается образование застойных зон в смеси бисера с суспензией и появляется возможность диспергировать суспензии с вязкостью до 10 Па·с. Лопасти мешалки 5 и отбойные лопасти 3 имеют круглую форму.

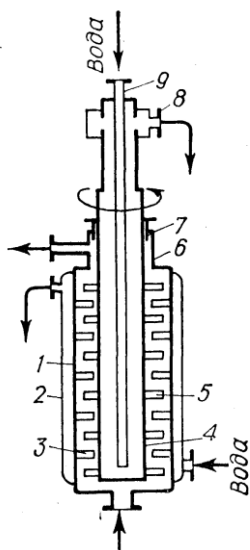
Скорость движения смеси рабочих тел с суспензией в рабочей камере атритора непрерывного действия наименьшая вблизи вала мешалки и наибольшая в зоне концов лопастей. С целью повышения равномерности перемешивания вал мешалки делают большого диаметра и полым. Последнее позволяет повысить эффективность отвода выделяемого при диспергировании тепла путем подачи охлаждающей воды внутрь вала. Кроме того, конструктивно такое решение позволяет отказаться от специального устройства для отделения шаров от выходящей из машины суспензии. При этом разгрузка суспензии осуществляется через узкий зазор

(щель) между вращающимся валом и установленным в верхней части камеры кольцом, которое задерживает рабочие тела.

Атриторы непрерывного действия имеют объем рабочей камеры несколько десятков литров. В рабочую камеру атритора загружают сферические тела размерами 1-5 мм, изготовленные из легированной стали, твердого фарфора (стеатита), оксида алюминия, специального стекла и других износостойких материалов. Объемное заполнение камеры рабочими телами обычно составляет около 80%.

Вал мешалки имеет частоту вращения 300-400 об/мин. Для переработки высоковязких паст атриторы снабжают высокомоощными электродвигателями. Например, у аппарата с объемом рабочей камеры 27 дм<sup>3</sup> при частоте вращения вала мешалки 370 об/мин мощность электродвигателя составляет 37 кВт. Атриторы могут иметь привод с бесступенчатым регулированием частоты вращения мешалки.

Главным достоинством атритора непрерывного действия является возможность диспергирования высоковязких и тиксотропных суспензий, для которых непригодны другие аппараты со свободно движущимися рабочими телами. В этих аппаратах можно диспергировать суспензии синтетических неорганических и органических пигментов с размерами первичных частиц 1-2 мкм. Немикронизированные грубодисперсные природные пигменты и наполнители диспергировать нельзя, так как они вызывают быстрый износ лопастей и стенок рабочей камеры.



**Бисерные диспергаторы.** Этот тип диспергаторов непрерывного действия представляет собой вертикально или горизонтально расположенный, как правило цилиндрический, корпус

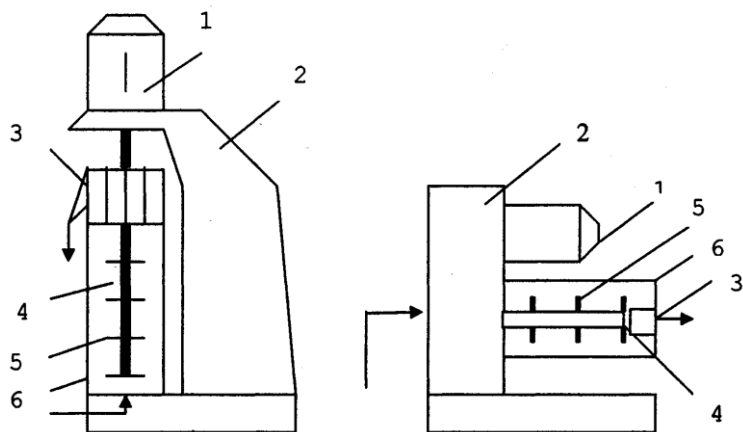
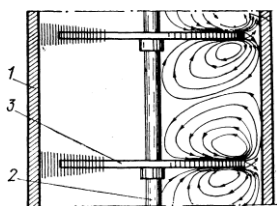


Рис. 7.6. Схема бисерных диспергаторов с вертикальным (а) и горизонтальным (б) расположением рабочей камеры: 1 – электродвигатель; 2 – станина; 3 – сепаратор; 4 – вал ротора; 5 – диски ротора; 6 – рабочая камера

(рабочую камеру), снабженный рубашкой охлаждения (рис. 7.6), внутри которого быстро вращается перемешивающее устройство в виде вала с насаженными на него дисками. Контейнер частично заполняется рабочими телами. Сначала в качестве рабочих тел применяли песок, и эти аппараты называли песочными мельницами (запатентованы в 1952 г.). Затем начали использовать стеклянный бисер, и соответственно диспергаторы стали называться бисерными. Через рабочую камеру непрерывно пропускается пигментная суспензия. Вал с дисками приводится во вращение с большой

скоростью (500-1500 об/мин), смесь бисера с пастой вследствие трения, возникающего при ее контакте с поверхностью вращающегося диска, центробежными силами отбрасывается к стенкам



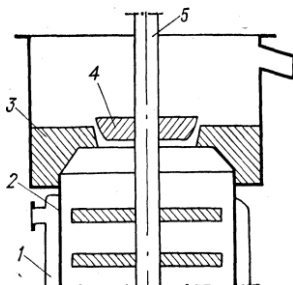
корпуса и, отражаясь от стенки, возвращается, образуя многократно циркулирующий между дисками поток. В этой зоне (рис. 7.7), называемой зоной перетирания (показана на примере диспергатора с вертикальным расположением рабочей камеры), происходит скольжение бисера вдоль поверхности диска, а также перекатывание частиц бисера относительно друг друга. Попадающие в зазор между частицами бисера пигментные агрегаты разрушаются в результате возникающих напряжений сдвига.

На выходе из контейнера пигментная суспензия отделяется от бисера с помощью специального устройства – сепаратора. Изменяя производительность насоса, подающего суспензию, регулируют время пребывания суспензии в корпусе аппарата и тем самым производительность и конечную степень дисперсности пигмента в пасте.

Частота вращения ротора бисерных диспергаторов, в значительной степени определяющая интенсивность движения бисера в рабочей камере, понижается с увеличением ее объема. Для каждого диспергатора имеется оптимальная частота вращения ротора, зависящая от его конструкции, вида и состава пигментной суспензии и других факторов. При частоте вращения ротора ниже и выше оптимальной производительность машины снижается, поэтому особый интерес представляют бисерные диспергаторы с бесступенчато регулируемой частотой вращения ротора. В подавляющем большинстве случаев частота вращения ротора бисерных машин является постоянной, реже двухступенчатой.

Как было отмечено, со снижением размеров рабочих тел не только повышается производительность диспергаторов со свободно движущимися рабочими телами, но и достигается более высокая дисперсность суспензии. Минимальный размер рабочих тел в бисерных диспергаторах определяется устройством, задерживающим бисер при выходе суспензии из рабочей камеры.

В бисерных машинах с вертикально расположенной рабочей камерой на выходе суспензии для задержания бисера устанавливают сетку со щелевидными отверстиями, которые забиваются бисером значительно меньше, чем квадратные и круглые отверстия. Размер рабочих тел (с учетом их износа) должен быть в 2-3 раза больше отверстий. Минимальный размер бисера обычно составляет 0,5-0,8 мм. Во избежание забивки щелевидных отверстий сетки бисером вязкость суспензии не должна превышать 2 Па·с. Для тиксотропных суспензий характерно резкое увеличение вязкости в месте выхода суспензии из диспергатора (в зоне прекращения механических воздействий). В этих случаях суспензию разгружают через кольцевой зазор (рис. 7.8) между диском, вращающимся вместе с



ротором, и круглым отверстием в крышке камеры. Торцевая поверхность диска имеет сферическую форму. Перемещая диск вдоль оси вала ротора, регулируют ширину зазора; минимальная ширина зазора 0,1-0,3 мм, минимальный размер улавливаемых рабочих тел около 0,5 мм.

В бисерных аппаратах с горизонтальным расположением рабочей камеры продукт диспергирования отделяется от бисера незасоряющимся ситом с отверстиями диаметром 0,4 мм или вибросепаратором с кольцевыми зазорами. Последний состоит из большого числа концентрических шлифованных колец из твердого сплава, совершающих вращательно-колебательные движения. Ширина зазора между кольцами выбирается в соответствии с размером бисера. Вибросепаратор с кольцевыми зазорами надежно отделяет бисер размером более 0,25 мм. Он не нуждается в юстировке, представляет собой сплошной блок, прикрепляемый к лобовой части корпуса, и на его замену затрачивается несколько минут. Благодаря использованию микробисера размером 0,25-0,3 мм в аппаратах этого типа можно получить весьма высокую степень диспергирования.

При выборе размера рабочих тел важно учитывать их плотность и вязкость диспергируемой пигментной пасты, а также тенденцию к неравномерному распределению бисера по объему рабочей камеры.

Исходя из соотношений (см. лекцию 6), очевидно, что при заданной вязкости пасты уменьшение диаметра частиц бисера ниже определенного размера может привести к существенному уменьшению интенсивности их движения и, как следствие, к снижению эффективности диспергирования. В этом случае следует использовать бисер из материала с повышенной плотностью.

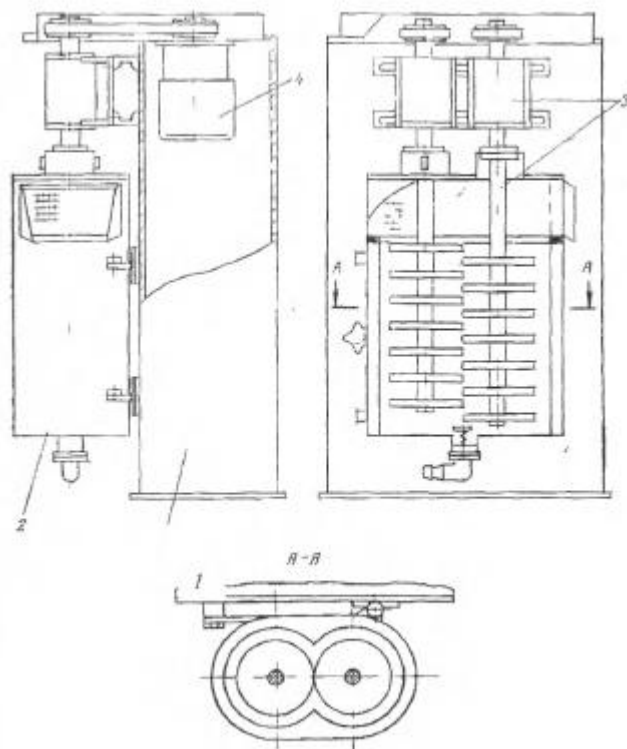
Под действием сил тяжести в диспергаторах с вертикальным расположением рабочей камеры бисер приобретает тенденцию к оседанию, то есть он концентрируется в нижней части камеры. Эта тенденция усиливается с ростом плотности и размеров частиц бисера, а также с уменьшением вязкости перерабатываемой массы. Локальный рост содержания бисера приводит к увеличению вязкости смеси рабочих тел с пигментной суспензией и, как следствие, к замедлению движения рабочих тел. Это, в свою очередь, вызывает снижение эффективности диспергирования и передачи выделяемого тепла от диспергируемой массы к охлаждающей воде. К снижению скорости дезагрегации пигментов и наполнителей ведет также уменьшение содержания бисера в верхней части рабочей камеры диспергатора ниже оптимального. Эти негативные явления приводят к ограничению высоты и, соответственно, объема рабочей камеры диспергаторов, а также к ограничению уровня ее заполнения бисером, который колеблется от 20 до 60 объемных процентов. Отклонение объемного заполнения вертикальной камеры бисерного диспергатора от оптимального значения, которое зависит от многих факторов (вязкость пигментной пасты, конструкция дисков и др.), оказывает заметное отрицательное влияние на эффективность работы аппарата.

В бисерных диспергаторах с горизонтальным расположением рабочей камеры (рис. 7.6) высота слоя бисера, осаждающегося под действием гравитационных сил, ниже, чем в машине с вертикальной камерой. Благодаря этому объемное заполнение камеры бисером можно довести до 90% и за счет этого повысить удельную производительность аппарата. При этом объем рабочей камеры можно увеличить до 300 дм<sup>3</sup>; аналогичный объем у бисерных диспергаторов с вертикальным расположением камеры обычно не превышает 150 дм<sup>3</sup>.

Недостатком аппаратов с горизонтальным расположением рабочей камеры является то, что перерабатываемая масса в процессе перемещения к выходу из диспергатора увлекает бисер в том же направлении. Результатом этого является неравномерное распределение бисера по длине рабочей камеры (обеднена зона входа и повышенное содержание в зоне выхода продукта). Это вызывает явления, аналогичные явлениям, связанным с оседанием бисера в аппаратах с вертикальным расположением рабочей камеры, — замедление движения бисера на выходе из диспергатора и так называемый застой перерабатываемой массы. Последнее сопровождается снижением эффективности диспергирования и теплоотдачи от массы внутри рабочей зоны к охлаждающей воде и, следовательно, ведет к перегреву перерабатываемой массы.

С увеличением размера бисерного диспергатора горизонтального типа при примерно равных окружных скоростях вращения дисков ротора возрастает скорость подачи перерабатываемой массы на вход аппарата, что способствует усилению эффекта неравномерности распределения бисера по длине рабочей камеры. Этот же результат получается при уменьшении размера частиц бисера и повышении вязкости перерабатываемой массы.

К уменьшению неравномерности распределения рабочих тел по длине рабочей камеры бисерных диспергаторов обоих типов приводит увеличение скорости вращения дисков. С этой же целью разработаны и выпускаются отечественной промышленностью бисерные диспергаторы с двумя роторами (рис. 7.9), отличительной особенностью которых является высокая интенсивность движения рабочих тел.



Такого же эффекта можно добиться за счет использования дисков специальной формы, при вращении которых интенсифицируется движение содержимого рабочей камеры не только в радиальном, но и в осевом направлении. В наибольшей степени неравномерность распределения выражена при использовании сплошных дисков. В настоящее время применяются диски, снабженные вырезами, пазами и отверстиями, а также эксцентрично закрепленные на валу по спирали кольцевые диски (рис.45). Диски с винтовым ребром и винтообразно расположенные эксцентриковые диски (рис. 45) способствуют подъему бисера из нижней части вертикальной камеры и более равномерному распределению рабочих тел по длине горизонтальной.

В аппаратах горизонтального типа используется комбинация косо и радиально расположенных дисков (рис.50). Последние образуют вдоль камеры ряд отсеков, через которые последовательно проходит диспергируемая суспензия. В каждом из таких отсеков за счет вращения косых дисков создается возвратно-поступательное движение смеси бисера с суспензией в осевом направлении. Это обеспечивает интенсивное движение бисера и его равномерное распределение по длине камеры.

Особенностью процесса диспергирования в бисерных диспергаторах в отличие, например, от шаровых мельниц, является характерное для аппаратов непрерывного действия **разброс времени пребывания отдельных частиц в рабочем контейнере**. Существует **две идеальные модели аппарата** непрерывного действия: модель идеального вытеснения (МИВ) и модель идеального смешения (МИС). При моделировании процессов химической технологии теоретический закон распределения времени пребывания частиц может задаваться уравнениями математической модели того или иного процесса, описывающей структуру потоков в аппарате.

В соответствии с моделью идеального вытеснения принимается поршневое течение без перемешивания вдоль потока при равномерном распределении веществ в направлении, перпендикулярном движению (рис. 7.10). В аппарате идеального вытеснения поток движется равномерно,

- т.е.:
- в любом поперечном сечении все частицы имеют одинаковую скорость;
  - $\tau$  – время пребывания всех частиц в аппарате одинаково и равно среднему времени пребывания  $\theta$ .

Вид кривой отклика для идеального вытеснения при импульсном вводе индикатора представлен на рисунке 7.10.

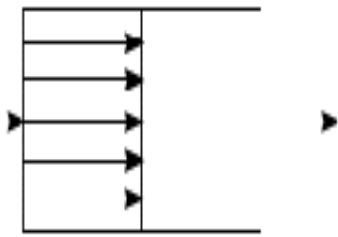


Рис. 8.1 – Модель идеального вытеснения

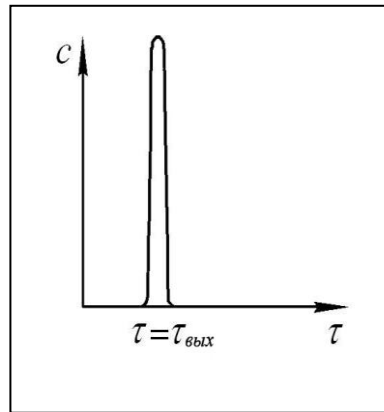


Рис. 7.10 – Кривая отклика при импульсном вводе индикатора в аппарат идеального вытеснения

Из характеристики кривой отклика следует, что в выходной жидкости в определенный момент времени концентрация индикатора практически мгновенно возрастает, а затем также мгновенно снижается до нуля. Сигнал, фиксируемый на выходе в момент  $\tau = \theta = V/V_c$  (где  $V$  – объем аппарата;  $V_c$  – объемная скорость потока) в точности соответствует сигналу на входе в момент ввода вещества-индикатора.

Математическое описание модели идеального вытеснения:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -w \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (7.1)$$

где  $c$  — концентрация вещества (содержание частиц);  $t$  — время;  $w$  — линейная скорость потока;  $x$  — координата.

К модели идеального вытеснения наиболее близки аппараты, выполненные в виде длинных труб.

В качестве аппарата идеального смешения можно рассмотреть аппарат с мешалкой, через который проходит поток. Модель аппарата представлена на рисунке 7.11. В аппарате идеального смешения происходит мгновенное равномерное распределение частиц по всему объему.

Кривая отклика в аппарате идеального смешения при мгновенном вводе индикатора представлена на рисунке 7.11. Время пребывания частиц потока в аппарате идеального смешения распределено неравномерно: некоторые частицы сразу попадают к выходу из аппарата и выйдут из него, а некоторые надолго задержатся в аппарате.

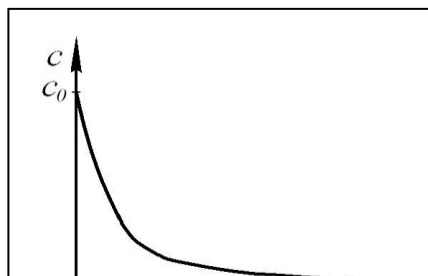
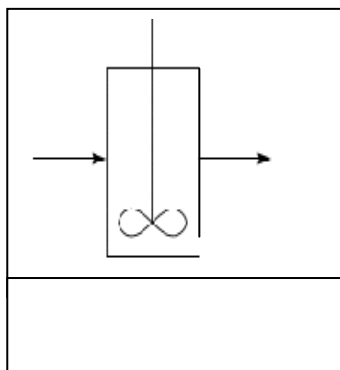


Рис. 7.11 – Кривая отклика при импульсном вводе индикатора в аппарат идеального смешения

Математическое описание модели идеального смешения

$$C = C_0 e^{-\tau/\theta} \quad (8.2)$$



$$c_0 = \frac{M_a}{V}$$

где  $c_0$  – начальная концентрация индикатора;  $M_a$  – количество индикатора;  $c$  – текущая концентрация;  $\theta = V/Vc$  – среднее время пребывания частиц в аппарате.

К аппаратам идеального смешения близки сосуды с интенсивным перемешиванием.

Очень часто потоки в промышленных аппаратах не соответствуют ни идеальному вытеснению, ни идеальному смешению. По гидродинамической структуре потоков их относят к аппаратам промежуточного типа. Наибольшее распространение среди промежуточных моделей получили ячеечная.

Ячеечная модель – схематически представляет собой реальный аппарат как некоторое число  $n$  одинаковых последовательно соединенных аппаратов идеального смешения (рисунок 7.12).

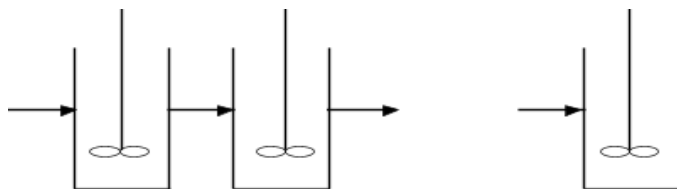


Рисунок 7.12 – Ячеечная модель структуры потоков

Для ячеечной модели дифференциальная функция распределения времени пребывания имеет вид:

$$c = \frac{n^n (\tau/\theta)^{n-1} e^{-n\tau/\theta}}{(n-1)!} \quad (7.2)$$

где  $n$  – количество ячеек;  $\theta$  – время пребывания частиц в аппарате;  $\tau$  – текущее время

График этой модели представлен на рисунке 7.13.

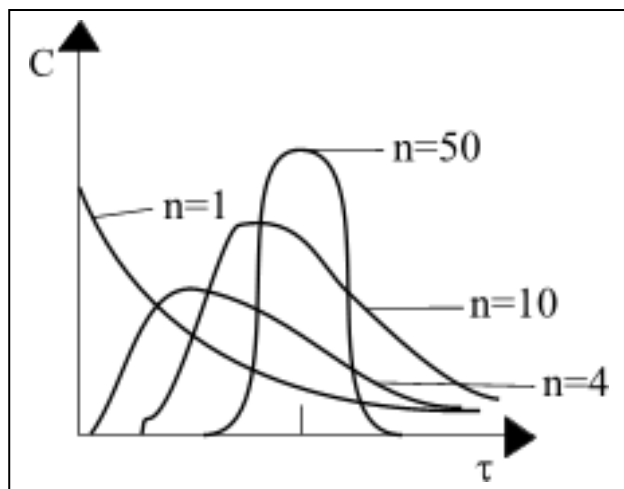


Рис. 7.13 – Кривые отклика для ячеечной модели при импульсном вводе индикатора

При  $n = 1$  ячеечная модель переходит в модель идеального смешения, а при  $n = \infty$  – в модель идеального вытеснения.

Выходная кривая ячеечной модели при импульсном возмущении имеет вид, представленный на рис. 7.13.

Ячеечной моделью оценивают функции распределения в последовательно соединенных аппаратах с мешалками.

Анализ работы бисерных машин различного типа позволяет сделать заключение о том, что в первом приближении в диспергаторах с горизонтальным расположением контейнера небольшого объема (до 50 дм<sup>3</sup>) структура потока близка к идеальному перемешиванию, а с вертикальным расположением – к идеальному вытеснению.

Для бисерных диспергаторов с большим объемом рабочего контейнера характерно то, что последний перегороден в поперечном сечении дисками ротора, при этом образуются как бы отдельные ячейки, которые сообщаются кольцевыми зазорами, образующимися между стенками контейнера и периферией дисков. По этим зазорам паста перетекает из одной ячейки в другую, а в каждой отдельной ячейке образуется замкнутый контур течения. Это дает право рассматривать бисерные машины большой производительности как аппараты ячеечной модели.

Анализ работы бисерных диспергаторов показывает, что наименее эффективным является режим, близкий к модели идеального смешения. Вероятность пребывания частиц в аппарате идеального смешения рассчитывается по уравнению

$$D = m/m_0 = (\tau / \theta) e^{-\tau/\theta}. \quad (7.3)$$

где  $D$  – доля частиц  $m$ , остающихся в аппарате по истечении времени  $t$ , от числа частиц  $m_0$ , загруженных в аппарат.

Из формулы (7.14) видно, что к моменту времени  $t = \theta$   $D = e^{-1} = 0,37$ . То есть к моменту времени 37% частиц задержатся в аппарате, а остальные (63%) покинут его. Естественно, пигменты и наполнители, находившиеся в зоне диспергирования роткий срок, будут обладать более низкой дисперсностью, чем те, которые подвергались диспергирующему воздействию длительное время.

Это подтверждают результаты эксперимента, заключающегося в импульсной подаче на вход бисерного диспергатора, через который пропусклся определенный объем суспензии микроталька в том же лаке (рис. 7.14). На через определенное время отбирали

которые оценивали содержание и дисперсность наполнителя. Как видно из представленных данных, значительная доля частиц микроталька покинула диспергатор раньше достижения среднего времени их пребывания в аппарате. Эти частицы характеризуются показателем дисперсности по прибору «Клин» большим, чем частицы, срок пребывания которых в зоне диспергирования не меньше  $\theta$  (30-45 и 23-25 мкм соответственно). Таким образом, при большом разбросе времени пребывания частиц пигмента в диспергаторе (широкая кривая распределения) в суспензии на выходе из аппарата содержатся крупные пигментные агрегаты (находившиеся в зоне диспергирования недостаточное для достижения необходимой степени дезагрегации время). Следствием этого является высокое значение степени дисперсности полученного продукта по прибору «Клин» и, как правило, необходимость дополнительного диспергирования, что сопряжено с увеличением расхода энергии на получение продукта. В частности, в ходе вышеописанного эксперимента было показано, что для достижения степени дисперсности всей массы микроталька, соответствующей показателю по прибору «Клин» 25 мкм, необходимо трижды пропустить суспензию через диспергатор.

Существует несколько путей уменьшения разброса времени пребывания пигментов и наполнителей в бисерных диспергаторах – наращивание количества ячеек, ограниченных дисками ротора, увеличение объемной скорости подачи суспензии на вход аппарата, применение многокамерных аппаратов.

Первый путь связан с увеличением отношения длины рабочей камеры к диаметру при ее одинаковом объеме, в результате чего возрастает количество дисков ротора. В результате этого разброс времени пребывания частиц пигментов и наполнителей в зоне диспергирования уменьшается вследствие приближения режима работы аппарата к модели идеального вытеснения. Кроме того, значительно повышается производительность аппарата, что может быть показано расчетным путем.

Изменение степени дисперсности пигментов в процессе дезагрегации описывается следующим уравнением:

$$r = r_0 e^{-kt}, \quad (7.4)$$

где  $t$  – продолжительность процесса диспергирования;  $k$  – константа диспергирования;  $r, r_0$  – соответственно величины текущего и исходного среднего размера частиц пигмента. Из этого выражения можно получить формулу для расчета константы диспергирования:

$$k = \ln(r_0/r)/t. \quad (7.5)$$

Взаимосвязь исходной, конечной (заданной) степени дисперсности и среднего времени пребывания частиц пигмента в рабочем контейнере бисерного диспергатора определяется следующими выражениями:

для модели идеального перемешивания:

$$r_0/r_k = 1 + k\theta, \quad (7.6)$$

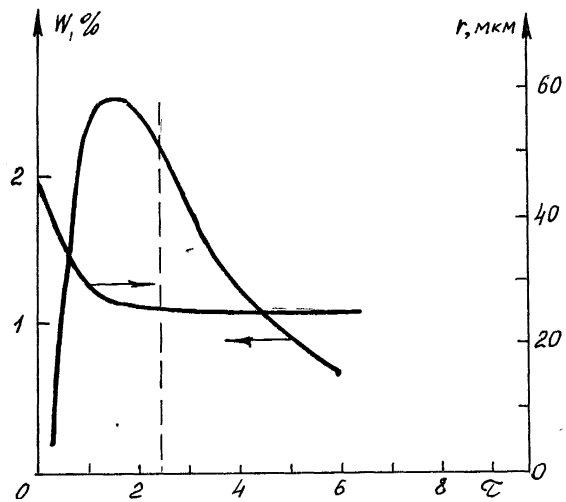


Рис. 7.14 Кривые зависимости содержания  $W$  и размера агрегатов микроталька  $r$  на выходе из бисерного диспергатора от времени диспергирования

в ап-  
менту  
этому

ко-

лак,

выходе  
пробы, в

где  $r_k$  – заданная конечная степень дисперсности пигмента;

для ячеечной модели:

$$r_0/r_k = (1 + k \theta)^n, \quad (7.7)$$

где  $n$  – количество ячеек.

Если задаться средним временем пребывания частиц пигмента в бисерном диспергаторе, режим работы которого описывается моделью идеального смешения, равным 20 мин, то при среднем исходном размере агрегатов частиц пигмента 150 мкм и константе диспергирования  $k=0,05 \text{ мин}^{-1}$  расчетная конечная степень дисперсности пигмента, полученная при подстановке принятых параметров в уравнение (7.6), составит 75 мкм.

В случае создания условий, при которых режим работы диспергатора описывается ячеечной моделью с  $n = 2$ , расчет по формуле (7.7) при тех же значениях  $\theta$  и  $k$  дает конечную степень дисперсности пигмента 38 мкм. Для достижения степени дисперсности 75 мкм в этих условиях диспергирования необходимое среднее время пребывания частиц пигмента в диспергаторе равно 8,4 мин. То есть замена модели идеального смешения на ячеечную с  $n = 2$  позволяет повысить производительность диспергатора более чем в два раза.

Однако помимо достоинств подобная конструкция диспергаторов имеет и недостатки. Практика показывает, что при их работе обостряются проблемы, связанные с неравномерностью распределения бисера по длине рабочей камеры. посредством использования дисков специальной формы (см. рис. 45а).

В качестве шага в направлении уменьшения разброса времени пребывания пигментных частиц в зоне диспергирования можно рассматривать создание двухкамерных ( $n=2$ ) бисерных диспергаторов горизонтального типа. Дополнительным преимуществом таких аппаратов является возможность создания разных условий диспергирования в первой и второй камерах.

Как модификацию бисерных диспергаторов, позволяющую повысить равномерность пребывания пигментов в зоне диспергирования при сохранении высокой интенсивности движения рабочих тел, можно рассматривать сравнительно недавно разработанный аппарат, в качестве рабочих тел в котором применяются магнитотвердые сферические тела диаметром 1,5—5 мм, изготовленные из оксидной керамики на основе гексаферрита бария. Этот аппарат, названный электромагнитным диспергатором, имеет рабочую камеру из ферромагнитного материала, помещенную в электрическую обмотку (индуктор) соленоидального типа (рис.48). Рабочая камера 3 разделена на секции (ячейки) перегородками с отверстиями размером меньше минимального диаметра рабочих тел и на 50 % объема заполнена рабочими телами. При подаче в индуктор переменного тока промышленной частоты (50 Гц) находящиеся в камере магнитные тела приходят в интенсивное движение по сложным траекториям, обусловленным их взаимными соударениями. Наличие перегородок обеспечивает высокую равномерность пребывания пигментов в рабочей камере диспергатора. Для охлаждения и регулирования температуры суспензии рабочая камера снабжена рубашкой, в которую поступает проточная вода.

Достоинствами электромагнитного диспергатора являются отсутствие сложных механических устройств для приведения в движение рабочих тел, простота конструкции и обслуживания, высокая объемная производительность, более низкий удельный расход электроэнергии, чем в шаровых мельницах и бисерных диспергаторах, герметичность, бесшумность работы.

Широкое распространение аппаратов этого типа сдерживает невысокая износостойкость и темная окраска рабочих тел. Поэтому их применяют главным образом для диспергирования грубодисперсных немикронизированных природных пигментов и наполнителей при получении легкотекучих грунтовок. Разрабатываются износостойкие белые оболочки для рабочих магнитных тел, использование которых резко расширит область применения этого перспективного диспергатора.

С целью уменьшения разброса времени пребывания пигментных частиц в рабочем контейнере некоторые производители в качестве направления конструктивного развития бисерных диспергаторов выбрали создание аппаратов с большой удельной (отнесенной к единице объема рабочей камеры) скоростью пропускания перерабатываемой массы. Возможность увеличения скорости пропускания достигается за счет уменьшения отношения длины рабочей камеры к диаметру. Это способствует снижению гидравлического сопротивления аппарата (вследствие увеличения их диаметра), неравномерности распределения бисера по длине рабочей камеры за счет увеличения центрифугального эффекта от работы ротора с дисками и уменьшения линейной

скорости перемещения перерабатываемой массы в направлении выхода из рабочей камеры при заданной производительности аппарата. В таких диспергаторах за счет быстрого многократного пропускания через них пигментной суспензии достигается узкое распределение времени пребывания частиц в рабочем объеме диспергатора. В результате значительного сокращения времени однократного пропуска пигментной пасты через аппарат общая продолжительность диспергирования до заданного уровня значительно меньше, чем в случае попытки достижения такого же результата при пропуске пасты через аппарат один раз.

К аппаратам такого типа относятся, например, бисерные диспергаторы с горизонтальным расположением рабочей камеры (рис. 7.15) серии LMZ, выпускаемые фирмой Netzsch (Германия). Их особенностью является использование элементов, характерных для атриторов: со штифтами 5 и противоштифтами 4, закрепленными на внутренней стороне стенки рабочей камеры. Такое конструктивное решение позволяет значительно интенсифицировать процесс движения рабочих тел и снизить гидравлическое сопротивление аппарата. Для отделения бисера от перерабатываемой массы служит сетчатый патрон с большой поверхностью. Все это в комплексе обеспечивает большую пропускную способность аппарата (более 50 л/ч на литр рабочей камеры) даже в случае использования частиц бисера с маленьким диаметром частиц и при диспергировании высоковязких суспензий.

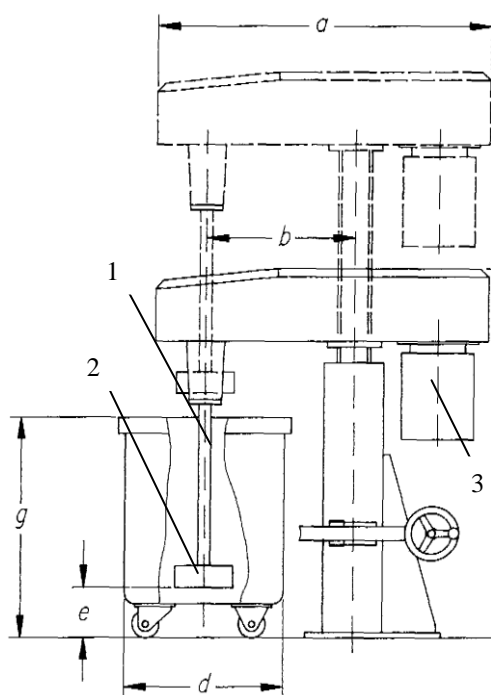


Рис. 7.15. Схема диспергатора «Turbo» : 1 - вал; 2 - сетчатый ротор;

Одним из решений проблемы уменьшения разброса времени пребывания пигментных частиц в рабочей камере является относительно недавняя разработка бисерных диспергаторов периодического действия, названных турбомельницами. К аппаратам этого типа относятся, например, диспергаторы серии Turbomill, выпускаемые фирмой Netzsch (рис. 7.15, 7.16). Диспергирующий орган аппарата представляет собой ротор в виде сетчатой корзины 2, закрепленной на полом валу 1 и заполненной стеклянным бисером. Внутри сетчатого ротора для интенсификации движения рабочих тел в процессе диспергирования помещен статор, закрепленный на штоке, пропущенном через полый вал 1. Диспергирующий орган с помощью гидравлического подъемника может перемещаться в вертикальном направлении. При поднятом положении диспергирующего органа под него подводят дежу с предварительно смешанными компонентами пигментной пасты (смешение в этом случае целесообразно проводить с помощью дисольвера с подъемной мешалкой). Корзину-ротор с бисером опускают в нижнее положение, погружая в перерабатываемую массу, после чего приводят во вращение вал и корзину. При вращении корзины перерабатываемая масса за счет возникающего насосного эффекта циркулирует в объеме дежи, прокачи-

ваясь через корзину с бисером. Бисер интенсивно движется за счет вращения корзины и наличия турбулизующего воздействия статора, обеспечивая диспергирование пигмента. В необходимых случаях (например, при диспергировании вязких паст) на внешней поверхности корзины могут быть смонтированы лопасти, способствующие интенсификации движения пигментной пасты в деже (рис. 7.16).

Компактность аппаратов Turbomill и легкость их очистки делает целесообразным их применение при производстве небольших партий пигментированных лакокрасочных материалов.

Общие достоинства бисерных диспергаторов: высокая объемная производительность при диспергировании тонкодисперсных легкодиспергируемых и микронизированных пигментов; небольшой объем корпуса и бисера, позволяющий сравнительно легко переходить на другой вид пигментной суспензии; бесшумность работы; возможность осуществления непрерывного автоматизированного процесса диспергирования в случае использования аппаратов непрерывного действия; более низкий удельный расход электроэнергии, чем у шаровых и трехвалковых диспергаторов.

Следует отметить, что объемная удельная производительность бисерных диспергаторов непрерывного действия горизонтального типа примерно в два раза выше, а удельный расход электроэнергии в два раза ниже, чем в аппаратах вертикальным расположением рабочей камеры. В с указанными преимуществами бисерные диспергаторы горизонтального типа находят все большее применение при получении пигментированных лакокрасочных материалов.

При выборе оборудования для диспергирования следует учитывать ряд ограничений, с которыми связано применение бисерных диспергаторов. Они непригодны для получения пастообразных суспензий типа густотертых красок и малоэффективны при диспергировании абразивных, природных грубодисперсных и тонкодисперсных труднодиспергируемых пигментов.

К общим недостаткам рассмотренных диспергаторов со свободно движущимися рабочими телами непрерывного действия (атриторы, бисерные диспергаторы) следует отнести необходимость предварительного смешения жидких и порошкообразных компонентов пигментных паст, для чего, как правило, используются смесители периодического действия.

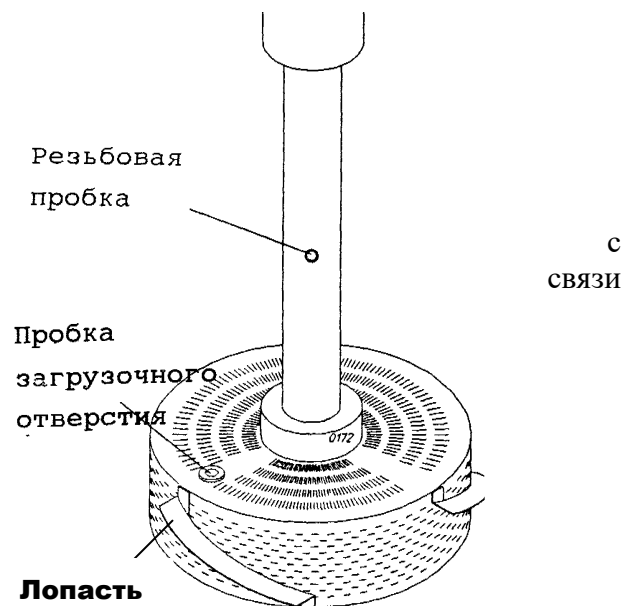


Рис.7.16. Внешний вид сетчатого ротора с лопастями