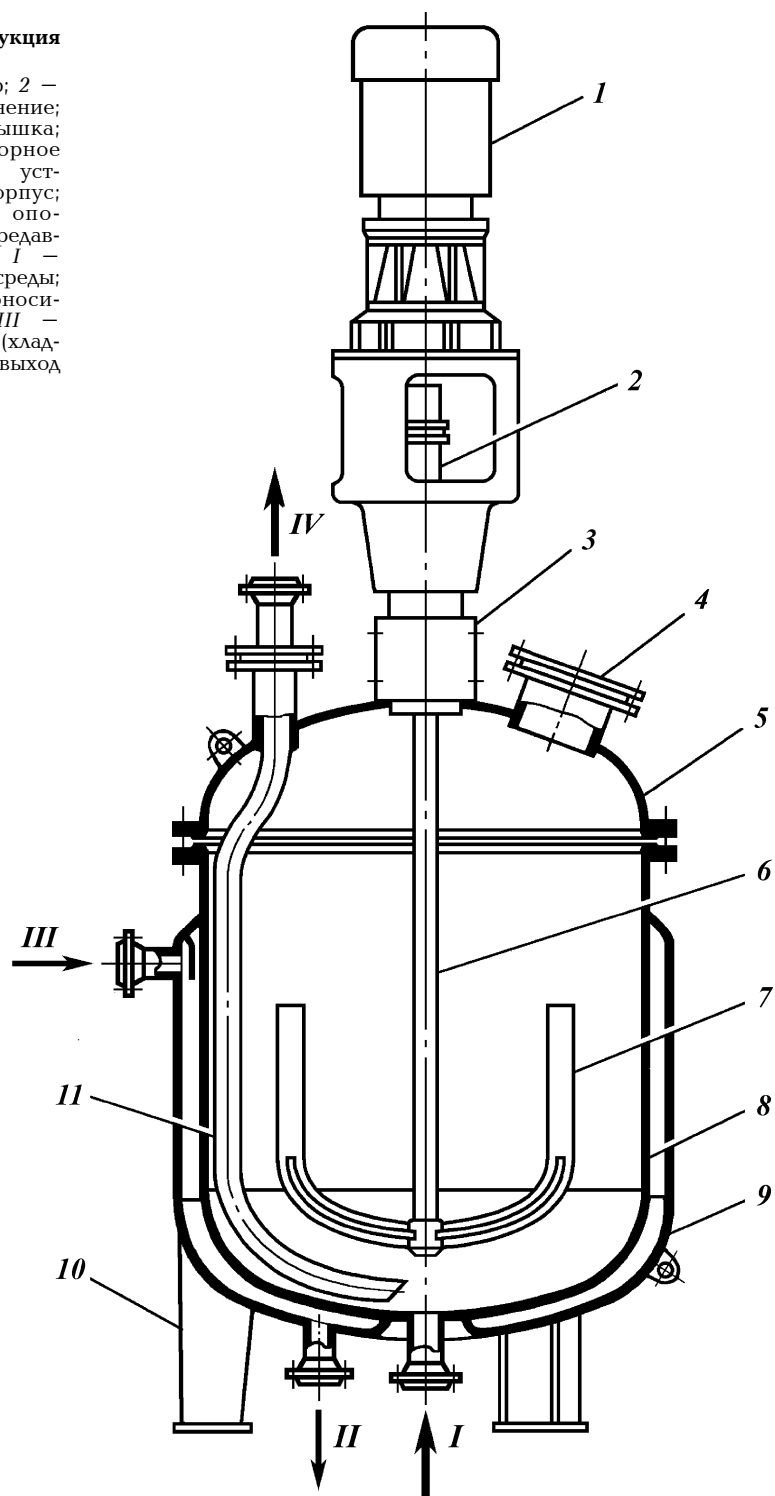




**Рис. XVII-1. Конструкция  
якорной мешалки:**

1 — мотор-редуктор; 2 — муфта; 3 — уплотнение; 4 — люк; 5 — крышка; 6 — вал; 7 — якорное перемешивающее устройство; 8 — корпус; 9 — рубашка; 10 — опора; 11 — труба перекачивания. Поток: I — вход исходной среды; II — выход теплоносителя (хладагента); III — вход теплоносителя (хладагента); IV — выход продукта



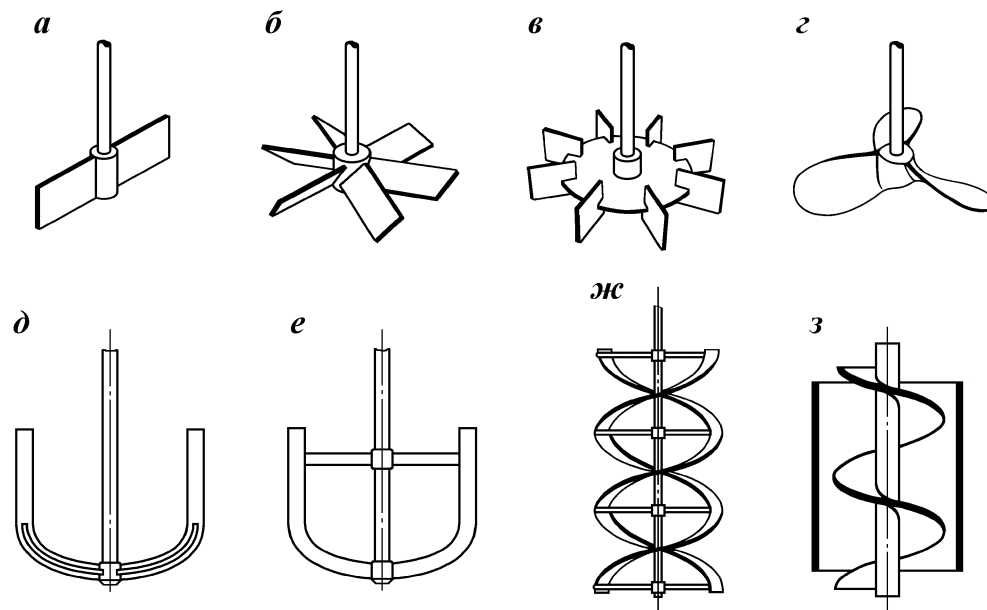
ройством, получающим вращательное или более сложное движение от внешнего привода, и связана с передачей механической энергии перемешиваемой среде.

Процесс, осуществляемый перемешивающими устройствами, характеризуется обтеканием элементов этого устройства жидкой средой.

Аппараты для механического перемешивания называются *мешалками*, основными узлами которых являются корпус, привод и перемешивающее устройство. Для охлаждения или подогрева перемешиваемых сред корпус мешалки может иметь наружную рубашку (гладкостенную или из полутруб), а внутри мешалки может быть размещен трубчатый змеевик. Для герметизации вывода вала из корпуса мешалки применяют гидрозатворы, сальниковые и торцовые уплотнения. В качестве привода мешалки используют электродвигатель с зубчатым редуктором или ременной передачей или специальный мотор-редуктор. На рис. XVII-1 приведена конструкция якорной мешалки.

Перемешивающие устройства, применяемые в мешалках, разнообразны по конструктивному оформлению и условно разделяются на быстроходные и тихоходные (рис. XVII-2). Первые работают преимущественно при турбулентном и переходном режимах движения жидкости, вторые — при ламинарном. К быстроходным относятся лопастные (рис. XVII-2 *а, б*), турбинные открытого (рис. XVII-2, *а̇*) и закрытого типов, пропеллерные (рис. XVII-2, *ӓ*), к тихоходным — якорные (рис. XVII-2, *я̈*), рамные (рис. XVII-2, *е*), ленточные (рис. XVII-2, *ж*) и шнековые (рис. XVII-2, *з*) перемешивающие устройства.

По преобладающему характеру движения жидкости выделяют мешал-



**Рис. XVII-2. Перемешивающие устройства:**

*а — а̇ — быстроходные; ӓ — з — тихоходные; а — лопастное; б — шестилопастное с наклонными лопастями; а̇ — турбинное открытого типа; ӓ — пропеллерное; ӓ — якорное; е — рамное; ж — ленточное; з — шнековое*

ки с круговым потоком (лопастные с вертикальными лопастями, турбинные открытого типа, якорные, рамные), осевым потоком (лопастные с наклонными лопастями, пропеллерные, ленточные, шнековые), радиальным потоком (турбинные закрытые). Применяют также мешалки со сложным планетарным движением перемешивающих устройств.

Основным элементом перемешивающего устройства лопастного типа является вертикальный вал, на котором может быть установлено несколько лопастей вертикально или наклонно под углом к горизонту от 45 до 60°. Вертикальные лопасти сообщают жидкости в основном вращательное движение, а наклонные способствуют перемещению жидкости вверх в вертикальном направлении. Окружная скорость на концах лопастей обычно не превышает 5 м/с.

При вращении лопастей на поверхности жидкости может образоваться воронка (рис. XVII-3), снижающая эффективность перемешивания контактирующих фаз. Для разрушения воронок к внутренней стенке корпуса крепят отражательные вертикальные перегородки шириной  $H$ , примерно равной  $0,1 D$ . Число перегородок обычно равно 4. Перегородки препятствуют горизонтальному вращению кольца жидкости и способствуют тем самым ее циркуляции в вертикальном направлении.

У турбинных мешалок перемешивающим устройством является лопастное колесо (турбинка), аналогичное рабочим колесам центробежных насосов с прямыми или загнутыми лопастями. Турбинки могут быть открытыми или закрытыми. По характеру работы открытые турбинки мало отличаются от лопастных мешалок. Закрытые турбинки, помещенные в корпус, создают более упорядоченную циркуляцию жидкости в мешалке, особенно при наличии направляющего аппарата, и способствуют тому, что струи жидкости, всасываемые в центре корпуса и выбрасываемые по периферии, достигают самых отдаленных частей мешалки. Изменение направления потока с вертикального на радиально-горизонтальное сопровождается минимальными потерями кинетической энергии. Частота вращения турбинок лежит в пределах 400÷2000 об/мин.

Для обеспечения интенсивного перемешивания во всем объеме аппарата за счет внутренней рециркуляции применяют пропеллерные мешалки. Пропеллерные перемешивающие устройства снабжены двух-, трех- или четырехлопастным винтом или пропеллером. Лопасти пропеллера по своей ширине обычно сначала расширяются, а потом сужаются; угол их наклона переменный. Пропеллеры создают интенсивный поток, направленный вдоль оси их вращения; иногда для упорядочения циркуляции жидкости в корпусе смесителя пропеллер помещают в направляющую трубу (диффузор); в трубе жидкость движется сверху вниз, в кольцевом зазоре между трубой и корпусом — снизу вверх или наоборот. Диаметр пропеллера чаще всего равен  $0,25\div 0,33$  внутреннего диаметра корпуса. В зависимости от размеров пропеллера частота его вращения составляет от 200 до 1500 об/мин.

Пропеллерные мешалки обычно используют для перемешивания жидкостей малой вязкости. Область их применения — получение эмульсий или суспензий с небольшим (до 10 %) содержанием твердых частиц размером менее 250 мкм. В мешалках больших размеров следует установить несколько самостоятельных пропеллеров.

При необходимости обеспечить перемешивание жидкости большой вязкости, применяют перемешивающие устройства якорного или рамно-

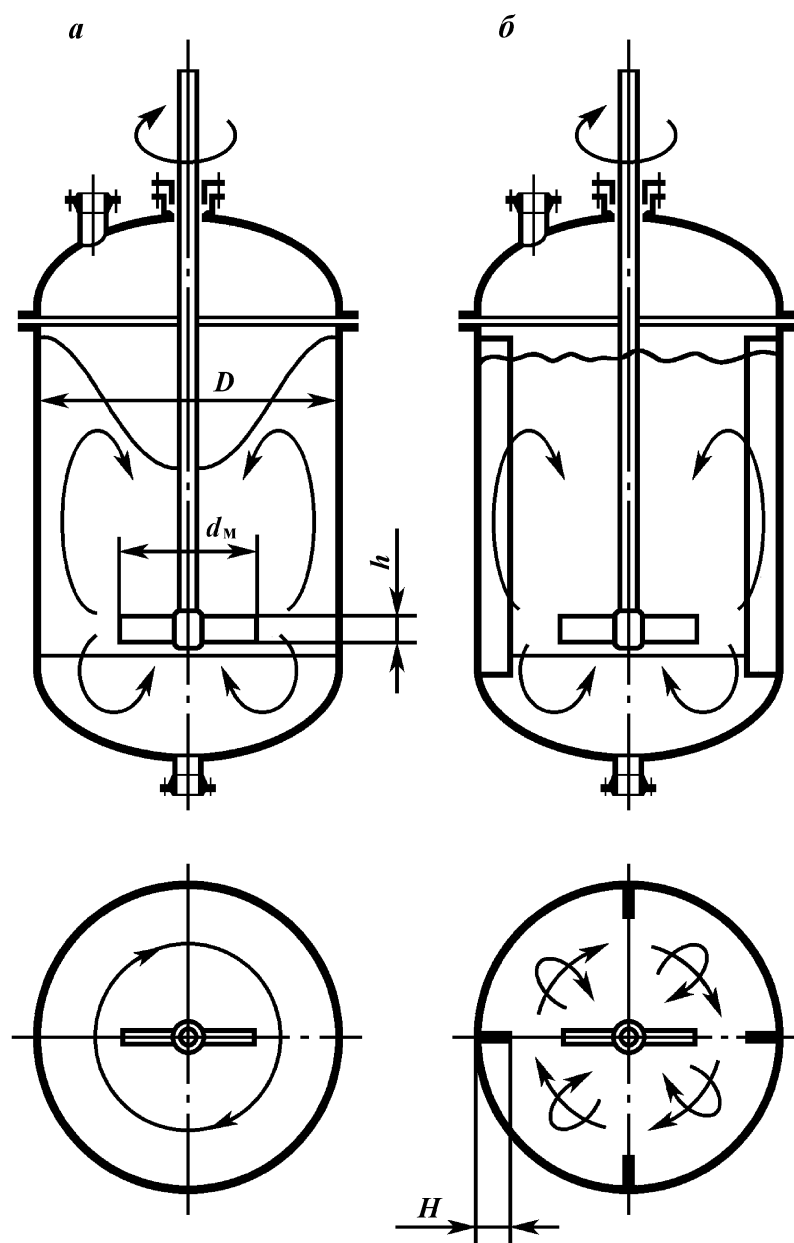


Рис. XVII-3. Схема потоков жидкости в аппарате с мешалкой:  
*а* — без отражательных перегородок; *б* — с перегородками

го типов с лопастями, повторяющими по своим очертаниям профиль корпуса. В этих конструкциях зазор между стенкой корпуса и перемешивающим устройством невелик ( $D/d_m \leq 1,05+1,25$ ). Это обстоятельство обуславливает большую турбулентность потока у самой стенки, что способствует лучшей теплопередаче через стенку и препятствует отложению осадка на

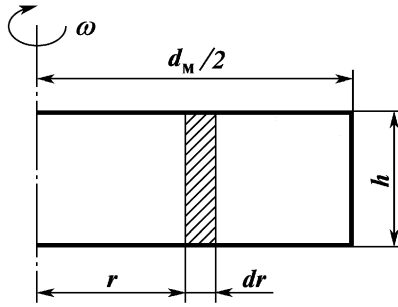


Рис. XVII-4. Схема одиночной лопасти (к расчету мощности на перемешивание жидкости)

стенке и днище. Поэтому такие мешалки часто используют при перемешивании суспензий, частицы которых характеризуются склонностью к налипанию на стенки.

Тихоходные ленточные и шнековые мешалки применяют для перемешивания высоковязких неньютоновских жидкостей.

Определение расхода энергии на перемешивание рассмотрим на примере вращения одиночной прямой лопасти (рис. XVII-3 и XVII-4), вокруг вала с угловой скоростью  $\omega$ , причем  $d_m/2$  — длина лопасти, а  $h$  — ее ширина. На расстоянии  $r$  от оси вращения выделим элемент длиной  $dr$ , который имеет окружную скорость  $W_r = \omega r$ .

На основании закона Ньютона сопротивление среды для этого элемента равно

$$dp = \xi \rho_{\text{ж}} (h \cdot dr) \frac{W_r^2}{2},$$

где  $\xi = f(\text{Re})$  — коэффициент сопротивления.

Элементарная мощность равна произведению силы на путь, пройденный ею за одну секунду,  $W_r = \omega r$ :

$$dN = W_r dp = \xi \rho_{\text{ж}} (h \cdot dr) \frac{\omega^2 r^2}{2} \omega r$$

или

$$dN = \xi \frac{\rho_{\text{ж}}}{2} h \omega^3 r^3 \cdot dr. \quad (\text{XVII.1})$$

Ширина лопасти  $h$  оценивается некоторой долей  $K$  диаметра перемешивающего устройства, т.е.

$$h = K d_m.$$

Подставляя это выражение для  $h$  в уравнение (XVII.1) и учитывая, что  $\omega = 2\pi n$ , где  $n$  — число оборотов перемешивающего устройства за одну секунду, имеем

$$dN = a \rho_{\text{ж}} d_m^3 n^3 r^3 \cdot dr,$$

где  $a$  — коэффициент.

Проинтегрировав это выражение в пределах от 0 до  $d_m/2$ , получим

$$N = K_N \rho_{\text{ж}} n^3 d_m^5,$$

откуда

$$K_N = \frac{N}{\rho_{\text{ж}} n^3 d_m^5}. \quad (\text{XVII.2})$$

Безразмерный комплекс  $K_N$  называют *критерием мощности*, он зависит от свойств перемешиваемой жидкости (вязкость, плотность), скорости вращения перемешивающего устройства и размеров мешалки.

В соответствии с теорией подобия запишем зависимость для определения  $K_N$  в критериальной форме:

$$K_N = A \cdot \text{Re}_{\text{ц}}^{\alpha} \text{Fr}_{\text{ц}}^{\beta}, \quad (\text{XVII.3})$$

где  $\text{Re}_{\text{ц}} = \rho_{\text{ж}} n d_m^2 / g$  — модифицированный критерий Рейнольдса;  $\text{Fr}_{\text{ц}} = n^2 d_m / g$  — модифицированный критерий Фруда.

Коэффициент  $A$  и показатели степени  $\alpha$  и  $\beta$  определяются экспериментально для перемешивающих устройств данного типа. Если при перемешивании воронка отсутствует или мала, то силой тяжести можно пренебречь и тогда критерий Фруда из уравнения (XVII.3) исключается.

Для основных типов нормализованных перемешивающих устройств в справочной литературе имеются графические зависимости  $K_N$  и  $\text{Re}_{\text{ц}}$ , установленные по экспериментальным данным.

В механических мешалках различают два режима перемешивания: ламинарный и турбулентный. Ламинарный режим ( $\text{Re}_{\text{ц}} < 30$ ) соответствует малоинтенсивному перемешиванию, при котором жидкость плавно обтекает лопасти мешалки, захватывается и вращается вместе с ними.

При увеличении числа оборотов перемешивающего устройства возрастает сопротивление среды вращению, возникает и интенсифицируется турбулентный режим перемешивания ( $\text{Re}_{\text{ц}} > 100$ ). При высокой степени турбулентности ( $\text{Re}_{\text{ц}} > 10^5$ ) критерий мощности  $K_N$  практически не зависит от критерия  $\text{Re}_{\text{ц}}$ . Эта область называется *автомоделной*, в ее пределах расход энергии определяется только инерционными силами.

Уравнение (XVII.3) используется для определения критерия мощности, при найденном значении которого из уравнения (XVII.2) определяется мощность  $N$ , необходимая для перемешивания при выбранном режиме и конструктивных параметрах мешалки.

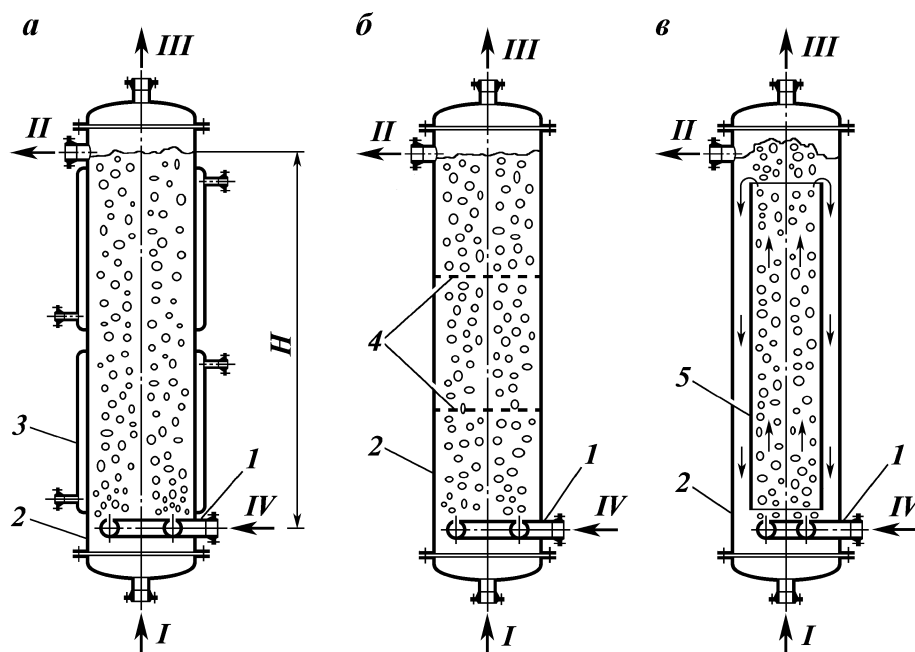
## АВДАІ ДАЕІ І А І АВДАІ АӨЕААІ ЕА

Этот способ перемешивания применяют для маловязких жидкостей. Сравнительная простота аппаратов с барботажным перемешиванием позволяет проектировать их на большие объемы, допускает уста-

новку антикоррозионной футеровки и гарантирует высокую надежность в эксплуатации. В качестве перемешивающего агента используются воздух, водяной пар и другие газы. При использовании газа в качестве барботирующего агента необходимо учитывать возможность образования в мешалке при взаимодействии перемешиваемого продукта с барботирующим газом взрывоопасных смесей.

В нижней части этих аппаратов установлен барботер *1* (рис. XVII-5, *а*), обеспечивающий равномерное распределение газа или пара по площади поперечного сечения аппарата. В качестве барботера используют перфорированные трубы, размещенные на дне смесителя. Сечение отверстий для выхода газа должно быть значительно меньше сечения коллектора, подводящего газ, с тем чтобы обеспечить равномерное распределение газа по всем отверстиям. Иногда с этой целью отверстия для выхода газа из барботера делают различного диаметра, увеличивая их размер на его концевых участках. При использовании аппарата с барботажным перемешиванием в качестве реактора для отвода тепла химической реакции корпус *2* оснащается рубашкой охлаждения *3*.

Пропускная способность аппарата с барботажным перемешиванием лимитируется скоростью газа, отнесенной к площади его свободного сечения, которая обычно не превышает 0,1 м/с. При более высоких скоростях газа значительно возрастает газосодержание в смеси, что при заданном количестве обрабатываемой жидкости приводит к неоправданному увеличению общего объема аппарата. Кроме того, при высоких скоростях газа



**Рис. XVII-5. Схемы аппаратов с барботажным перемешиванием:**  
*а* — пустотелого; *б* — секционированного; *в* — газлифтного; *1* — барботер; *2* — корпус; *3* — рубашка охлаждения; *4* — секционирующие перегородки; *5* — циркуляционная труба. Потoki: *I* — исходная жидкость; *II* — отходящая жидкость; *III* — отходящий газ; *IV* — газ



возникают его крупномасштабные пульсации, приводящие к возникновению пульсаций давления и вибрации аппарата.

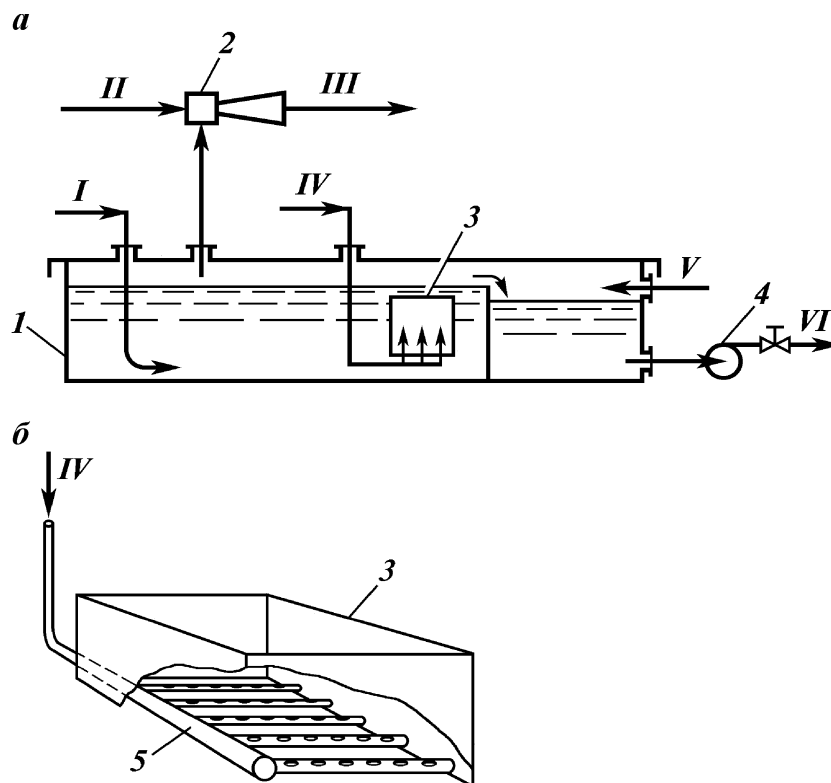
Необходимое давление газа на входе в барботер  $p$  определяется по формуле

$$p = p_0 + \rho_{\text{ж}} g H + \sum \xi \frac{\rho_{\text{г}} W_{\text{о.г}}^2}{2},$$

где  $p_0$  — давление над слоем жидкости в аппарате;  $H$  — высота слоя жидкости над барботером, м;  $\xi$  — суммарный коэффициент сопротивления барботера;  $W_{\text{о.г}}$  — скорость газа на выходе из барботера, м/с.

Аппараты с барботажным перемешиванием могут быть пустотелыми или секционированными по высоте горизонтальными перфорированными перегородками 4, которые служат промежуточными газораспределителями и уменьшают продольную циркуляцию жидкости (рис. XVII-5, б).

С целью упорядочения движения жидкостей при перемешивании организуют восходящий (нисходящий) поток в центральной части аппарата



**Рис. XVII-6. Схема установки дегазации серы фирмы Stork Comprimo SKL GmbH:**  
а — общий вид; б — барботажный смеситель газлифтного типа; 1 — емкость; 2 — эжектор; 3 — циркуляционный короб; 4 — насос; 5 — барботер. Поток: I — сера с установки Клауса; II — пар низкого давления; III — смесь воздуха, сероводорода и водяного пара; IV — воздух; V — продувочный воздух; VI — сера в хранилище

(рис. XVII-5, а) и нисходящий (восходящий) поток у его стенок, что может быть обеспечено, в частности, за счет установки в центре аппарата специальной циркуляционной трубы 5, работающей по принципу *газлифта*. При подаче газа в заполненный жидкостью аппарат в циркуляционных трубах образуется газожидкостная смесь, плотность которой меньше однородной жидкости, что и обеспечивает ее циркуляцию.

На рис. XVII-6 приведена схема установки для удаления  $H_2S$  из жидкой серы, основным элементом которой является барботажный смеситель газлифтного типа.

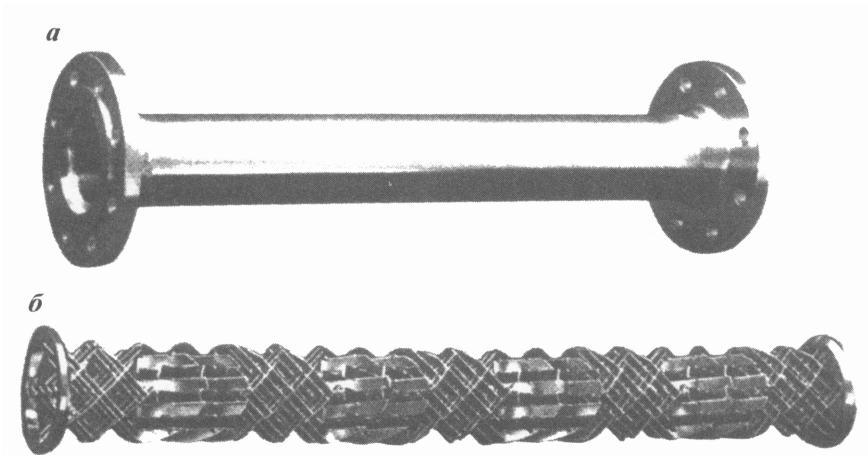
Взбалтывание при закачке или во время транспортировки и (или) понижение температуры приводят к высвобождению из недегазированной серы сероводорода, который собирается в пространстве над жидкой серой и концентрация которого может легко превысить нижний предел взрываемости  $H_2S$  в воздухе (около 3,5 % об.). Дегазация серы осуществляется в непрерывном режиме в специальной емкости 1 или на участке дегазации коллектора серы установки Клауса. Собственно дегазация идет в барботажном смесителе газлифтного типа 3. Поскольку циркуляционный короб 5 смесителя открыт снизу и сверху, циркулирующая в нем сера полностью перемешивается с содержимым емкости. Воздух, содержащий высвобожденный сероводород, вместе с дополнительным количеством продувочного воздуха удаляют из емкости с помощью эжектора 2 и, как правило, направляют в печь дожига. Дегазированная сера стекает через сливную перегородку в насосное отделение и перекачивается насосом 4 в хранилище.

## $\text{H}_2\text{S}$

При гидравлическом способе перемешивания применяют статические и циркуляционные смесители.

**Статические смесители** широко используются при переработке нефти и газа, в нефтехимии, при производстве и переработке пластмасс, очистке отходящих газов, питьевой и сточных вод, в производстве синтетических волокон и т.д. Высокая эффективность смешения, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, малое потребление энергии, небольшие размеры, отсутствие движущихся деталей — все это выгодно отличает статические смесители от других способов перемешивания.

На рис. XVII-7 показан статический смеситель для режима ламинарно-

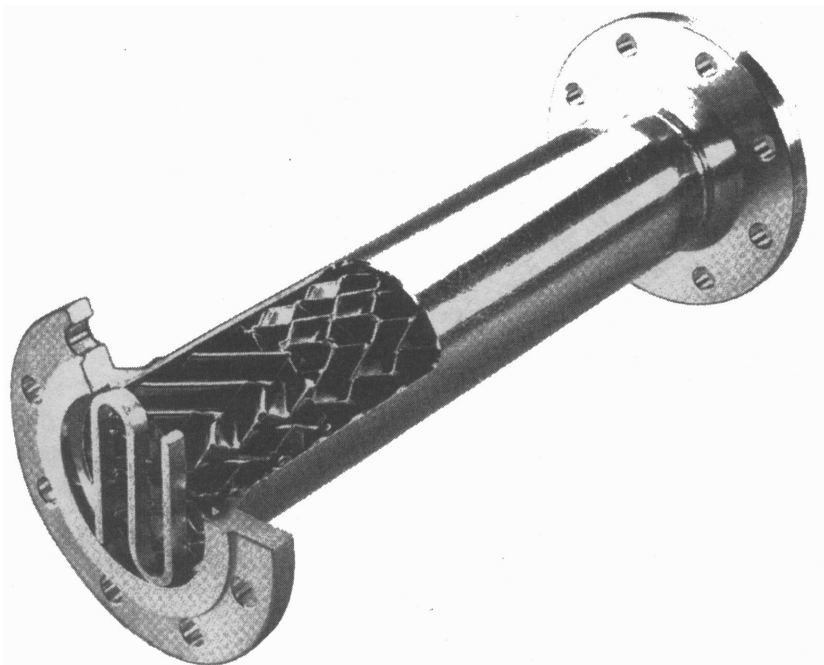


**Рис. XVII-7. Статический смеситель фирмы Sulzer для ламинарного режима течения:**  
*а* – корпус смесителя; *б* – перемешивающее устройство

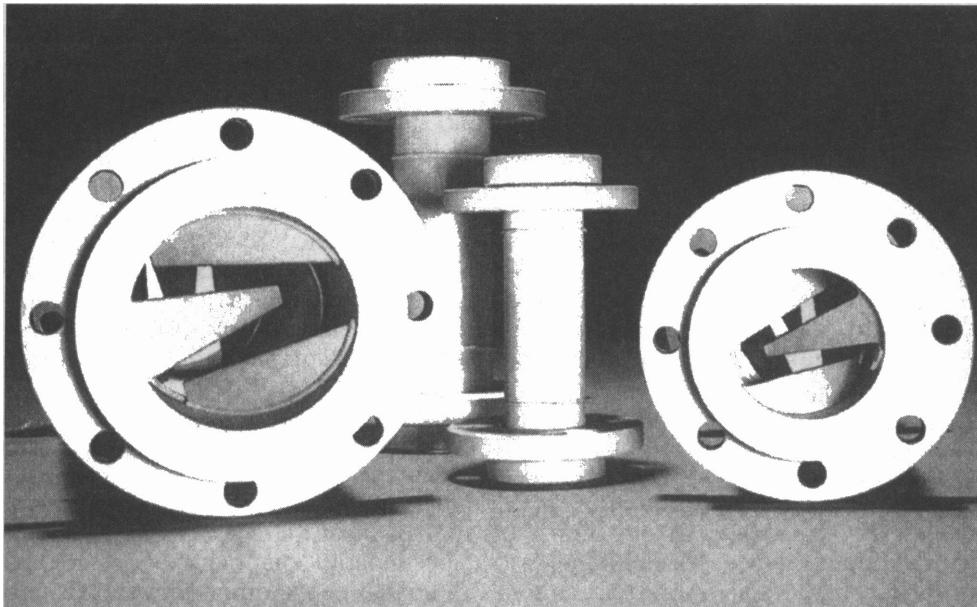
го течения, например для смешения высоковязких сред или сред с сильно различающейся вязкостью. Смеситель состоит из корпуса (рис. XVII-7, а), внутри которого установлено перемешивающее устройство (рис. XVII-7, б), представляющее собой несколько повторяющихся модулей, повернутых друг относительно друга на угол  $90^\circ$ . Каждый модуль образован из отдельных перекрещивающихся полос, соединенных точечной сваркой. Ширина полос, угол их наклона и количество модулей по длине потока определяют необходимую степень однородности потока на выходе из смесителя.

Статический смеситель, представленный на рис. XVII-8, используется главным образом для режима турбулентного течения, например для смешивания низковязких жидкостей или диспергирования несмешивающихся жидкостей. Такие смесители с успехом применяются при обессоливании сырой нефти при смешивании ее с менее минерализованной пресной водой.

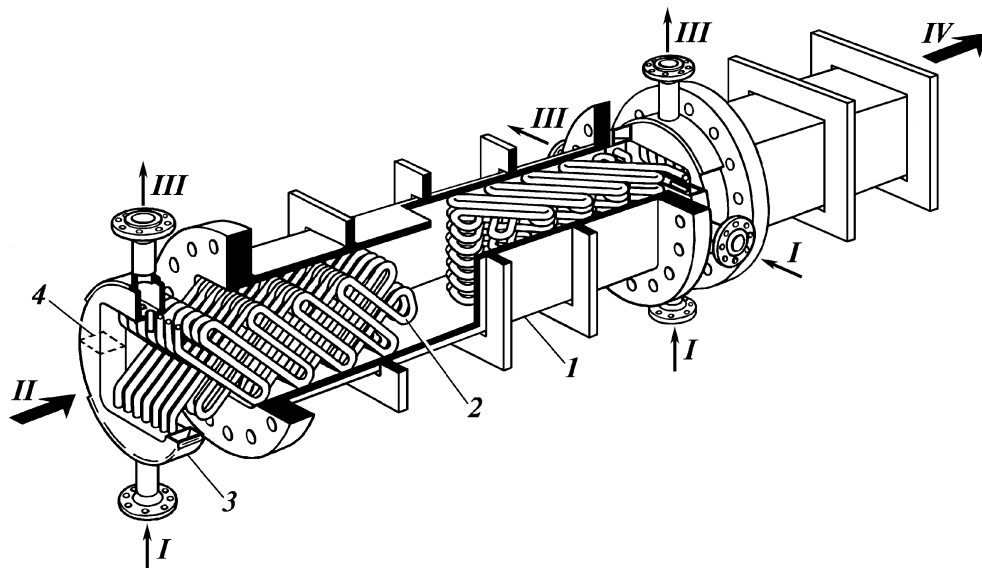
Для обработки питьевой и сточных вод применяются смесители, в которых направляющие перегородки не касаются друг друга и со всех сторон открыты потоку (рис. XVII-9). В зависимости от источника воды и дальнейшего ее использования необходимо добавлять в нее некоторое количество кислоты или щелочи. При нейтрализации воды может происходить образование тонкодисперсных суспензий гидроксидов металлов, которые с трудом выделяются из воды. С целью осаждения частиц из этих суспензий в стоки обычно добавляют химические *флокулянты*. При этом расходуемые смешиваемых потоков значительно различаются между собой, что требует применения эффективного смесителя, который также не должен засоряться. Как правило, в таких случаях используют смесители, изготовленные из пластмасс (полипропилена, фторопласта).



**Рис. XVII-8. Статический смеситель фирмы Sulzer для турбулентного режима течения.**



**Рис. XVII-9. Статические смесители фирмы Sulzer для перемешивания сред с возможным отложением осадка, изготовленные из полипропилена**



**Рис. XVII-10. Смеситель-реактор фирмы Sulzer:**

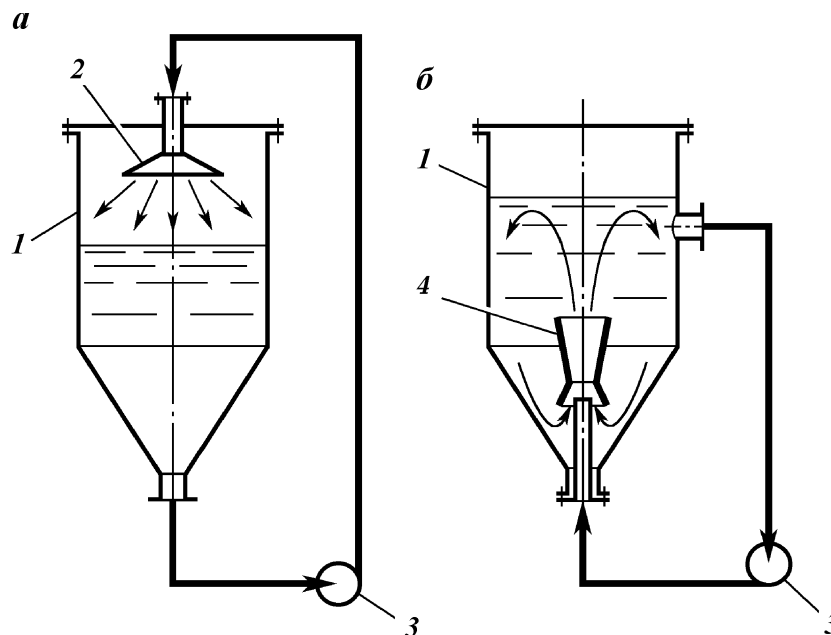
1 — корпус; 2 — статический смеситель, выполненный из теплообменных труб; 3 — распределительная камера; 4 — перегородка. Потoki: I — вход теплоносителя; II — исходное сырье; III — выход теплоносителя; IV — продукты реакции

Переход от периодического процесса смешения в емкости с мешалкой к непрерывному процессу с использованием статического смесителя-реактора позволяет повысить безопасность производства, существенно уменьшить габаритные размеры реактора и снизить потребление энергии. На рис. XVII-10 смеситель-реактор показан в момент установки статического смесителя. Статические смесители в таких реакторах играют роль теплообменных поверхностей и выполнены из труб, внутри которых циркулирует теплоноситель. Подобным образом удастся реализовать реакторы вытеснения с заранее заданным профилем температуры по длине аппарата.

**Смесители циркуляционного типа.** Широкое распространение получили смесители циркуляционного типа, состоящие из емкости 1 и центробежного насоса 3, который забирает жидкость из нижних слоев и подает ее на свободную поверхность через разбрызгиватель 2, осуществляя замкнутую циркуляцию (рис. XVII-11, а). Для усиления турбулизирующего эффекта в емкость иногда помещают решетку или перфорированный трубопровод, что обеспечивает более равномерное распределение жидкости по сечению емкости.

В частности, такой способ перемешивания используют при производстве товарного нефтепродукта путем компаундирования входящих в его состав компонентов.

Более интенсивно происходит перемешивание при использовании циркуляционного насоса в сочетании с эжектором (рис. XVII-11, б). Жидкость из верхней части емкости нагнетается в сопло эжектора. Выходящий из сопла поток увлекает окружающую эжектор жидкость, смешивается с



**Рис. XVII-11. Схемы циркуляционных смесителей:**

а — смеситель с циркуляционным насосом; б — смеситель с циркуляционным насосом и эжектором; 1 — емкость; 2 — разбрызгиватель; 3 — циркуляционный насос; 4 — эжектор



ней, и образующаяся смесь выбрасывается вверх. Таким образом, внутри объема жидкости, заполняющей емкость, в дополнение к внешнему циркуляционному контуру, создаваемому насосом, возникают внутренние циркуляционные токи, что обеспечивает более эффективное перемешивание смеси.