

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

А. В. Кириллов

**РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ
ТАРЕЛЬЧАТЫХ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ**

Утверждено в качестве учебного пособия
Ученым советом Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Комсомольск-на-Амуре
2014

УДК 66.048.05(07)
ББК 35.113-52я7
К431

Рецензенты:

Кафедра «Технология нефтехимических и углехимических производств»
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)», зав. кафедрой
доктор химических наук, профессор В. М. Потехин;
А. А. Кулик, кандидат технических наук, ведущий инженер
ООО «РН-Комсомольский НПЗ»

Кириллов, А. В.

К431 Расчет контактных устройств тарельчатых колонных аппаратов :
учеб. пособие / А. В. Кириллов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ
ВПО «КнАГТУ», 2014. – 70 с.
ISBN 978-5-7765-1041-0

В пособии обобщены сведения по классификации контактных массо-
обменных тарелок, их конструктивным особенностям и условиям приме-
нения. Приводятся основные методики расчета параметров устойчивой ра-
боты тарельчатых контактных устройств, гидравлического сопротивления.

Пособие предназначено для студентов направления 240100 «Хими-
ческая технология» всех форм обучения.

УДК 66.048.05(07)
ББК 35.113-52я7

ISBN 978-5-7765-1041-0

© Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования «Комсомольский-на-Амуре
государственный технический
университет», 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. НАЗНАЧЕНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОЛОННЫХ АППАРАТОВ.....	4
2. ТИПЫ ТАРЕЛЬЧАТЫХ МАССООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	7
2.1. Колпачковые тарелки.....	15
2.2. Бесколпачковые тарелки	24
2.3. Клапанные тарелки	28
2.4. Секционированные массообменные устройства	34
2.5. Рекомендации по выбору тарельчатых колонных аппаратов.....	37
3. РАСЧЕТ ТАРЕЛОК С ПЕРЕЛИВНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ	39
3.1. Расчет диаметра колонны.....	39
3.2. Расчет переливного устройства тарелки.....	48
3.3. Диапазон устойчивой работы тарелок	51
3.4. Гидравлическое сопротивление тарелок	54
3.5. Унос жидкости с тарелок.....	62
4. РАСЧЕТ ТАРЕЛОК БЕЗ ПЕРЕЛИВНЫХ УСТРОЙСТВ	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	69

ВВЕДЕНИЕ

В современной нефтеперерабатывающей промышленности одной из основных задач является разделение исходного сырья на узкие и, соответственно, более чистые фракции. Это достигается различными способами. К ним относятся разработка специальных конструкций элементов внутренних частей колонн (узлы ввода сырья, вывода боковых погонов, ввод и вывод промежуточного циркуляционного орошения и др.), подбор оптимальных технологических параметров, позволяющих обеспечить требуемую четкость разделения углеводородного сырья.

При проектировании технологического оборудования для разделения углеводородных систем на компоненты, в частности ректификационных колонн, большое внимание уделяется расчету контактных устройств аппарата, т.к. неверно подобранное контактное устройство может нарушить работу технологической установки.

Эффективность разделения нефти и нефтепродуктов зависит от способности контактного устройства (тарелки) обеспечить степень разделения в определенных сечениях колонного аппарата.

Конструктивное исполнение контактного устройства также влияет на производительность, устойчивую работу установки и гибкость технологического режима.

Оптимально спроектированная конструкция тарелки позволяет сократить количество таких тарелок, приходящихся на один колонный аппарат, т.е. снизить металлоемкость производства, снизить трудоемкость по обслуживанию и управлению технологическим процессом, повысить экономическую эффективность предприятия.

Следовательно, расчет контактных устройств колонных аппаратов не должен ограничиваться только определением пропускной способности тарелки, но должен содержать такие элементы, как всестороннее исследование устойчивой работы тарелки и колонны в целом, учет влияния конструктивных особенностей контактного устройства на протекание процесса разделения во фракционирующих аппаратах.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КОЛОННЫХ АППАРАТОВ

Гидравлический расчет колонн проводится с целью определения основных размеров аппаратов – диаметра, высоты, типа контактного устройства и его параметров, а также диапазона допустимого изменения нагрузок.

Особенно важно выполнение гидравлического расчета колонны по нескольким сечениям в связи с тем, что многие аппараты имеют разные нагрузки по пару и жидкости в различных сечениях.

Конкретное содержание гидравлического расчета колонны в значительной мере зависит от типа и конструкции контактного устройства. В общем случае гидравлический расчет колонного аппарата состоит из следующих последовательных шагов:

- 1) выбор типа и конструкции контактного устройства;
- 2) определение диаметра колонны;
- 3) определение основных размеров контактных устройств;
- 4) расчет гидравлического сопротивления контактных устройств;
- 5) проверка работоспособности контактных устройств (межтарельчатый унос жидкости, пропускная способность переливного устройства);
- 6) определение эффективности контактных устройств.

Основные размеры тарелок определяют равномерную, устойчивую и эффективную работу колонны в заданном диапазоне изменения нагрузок. К ним относятся такие конструктивные размеры тарелок, как соотношение рабочей площади и площади переливов, периметр слива жидкости, свободное сечение тарелки, основные размеры контактных элементов и расстояние между ними.

Тарелка работает устойчиво и равномерно всем сечением лишь в том случае, когда величина градиента жидкости Δ значительно меньше сопротивления сухой тарелки ΔP ($\Delta/\Delta P_{\text{сух}} < 0,5$) или градиент стекающей жидкости не превышает 20...25 мм, а нагрузка по жидкости – 90...100 м³/(м·ч).

Минимальная длина пути на тарелке (для однопоточных тарелок) или на каждом потоке (для многопоточных) должна быть не менее 0,5...0,6 м. В табл. 1.1 представлены ориентировочные значения относительной длины слива (периметра слива) Π/D (Π – периметр слива, D – диаметр).

Таблица 1.1

Значения периметра слива для контактных устройств

Тарелка	Значение показателя при среднем давлении в системе $P_{\text{ср}}$, атм		
	1	27	20 (абсорберы)
Однопоточная	0,75	0,8	0,85
Двухпоточная	0,6...0,7	0,7	0,75
Четырехпоточная	0,6	0,6	0,65

Ориентировочные значения эффективной рабочей площади тарелки (площадь, занятая под барботажем) и длину пути жидкости на тарелке $Z_{\text{ж}}$ можно определить при помощи графиков, приведенных на рис. 1.1 и 1.2.

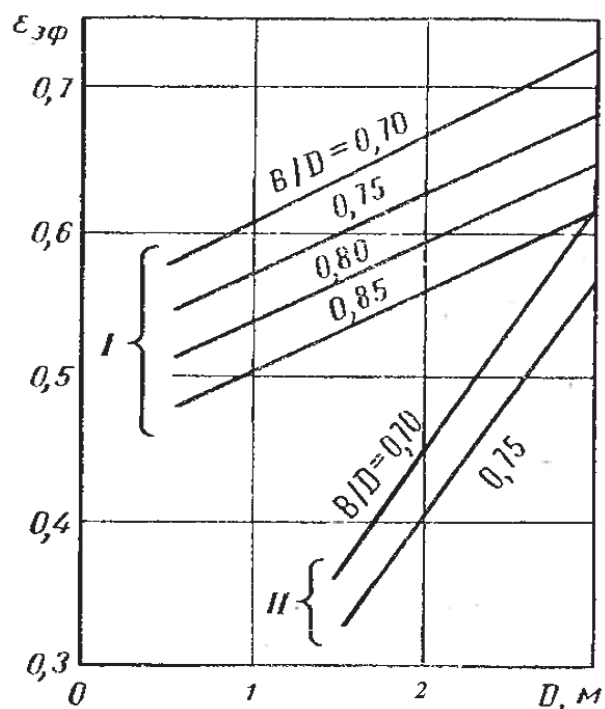


Рис. 1.1. Зависимость значений эффективной рабочей площади $\epsilon_{эф}$ однопоточных (I) и двухпоточных (II) тарелок от диаметра D :
 B (II) – периметр слива (длина сливной перегородки)

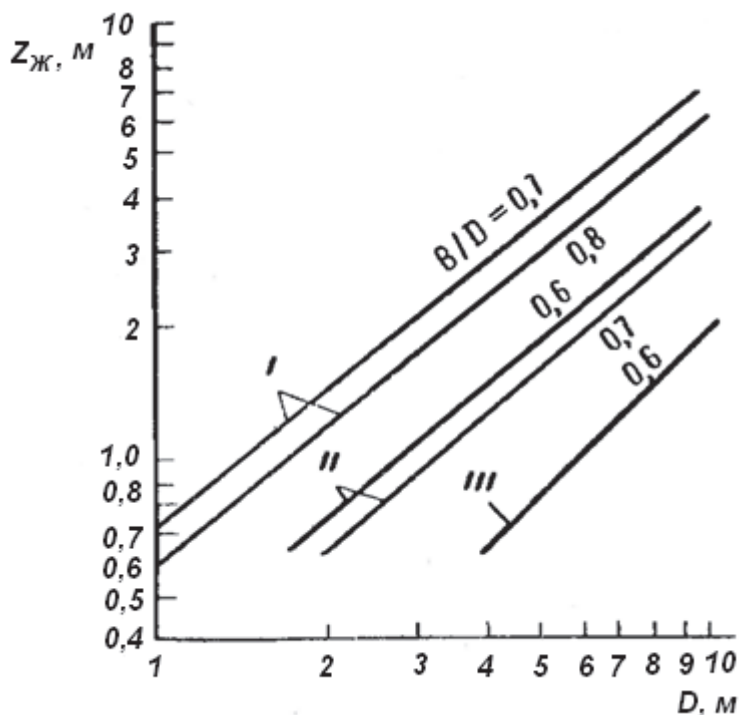


Рис. 1.2. Зависимость длины пути жидкости на тарелке от диаметра колонны: I – однопоточная тарелка; II – двухпоточная тарелка; III – четырехпоточная тарелка

2. ТИПЫ ТАРЕЛЬЧАТЫХ МАССООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Основные аппараты для массообменных процессов – ректификационные колонны, адсорбционные, абсорбционные и экстракционные аппараты – по металлоемкости составляют более половины всех аппаратов нефтеперерабатывающих установок. От их правильного технологического расчета и конструктивной пригодности зависит качество осуществления целенаправленного процесса.

Ректификационными колоннами называют вертикальные цилиндрические аппараты, предназначенные для четкого разделения смеси двух взаимно растворимых жидкостей с получением целевых продуктов требуемой концентрации. Для осуществления диффузии пары и жидкости должны как можно лучше контактировать между собой, двигаясь в ректификационной колонне навстречу друг другу.

Для обеспечения эффективного контактирования фаз ректификационные колонны снабжаются внутренними устройствами. В зависимости от конструкции этих устройств осуществляется непрерывное (в насадочных колоннах) и ступенчатое (в тарельчатых колоннах) контактирование фаз.

В тарельчатых колоннах контактные устройства монтируют горизонтально внутри колонны. Поверхности всех работающих ректификационных тарелок залиты жидкостью, стекающей вниз по колонне. Это обеспечивается устройством тарелок, при котором «лишнее» количество жидкости стекает с них на нижележащую тарелку.

На рис 2.1 представлена схема устройства ректификационной колонны.

Диаметр колонны D определяют из уравнения расхода по объему поднимающихся паров и допустимой их скорости. Диаметр колонны тем меньше, чем больше допустимые скорости паров. Следует иметь в виду, что увеличение скоростей в конечном счете вызывает необходимость неоправданного увеличения числа тарелок.

Значения допустимых скоростей зависят от конструкции тарелок, расстояния между ними, плотностей жидкой и паровой фаз в рассматриваемом сечении, поверхностного натяжения и других факторов.

При скоростях, существенно превышающих допустимое значение, может произойти унос потоком пара капелек жидкости с данной тарелки на вышележащую. На практике условия эксплуатации принято считать нормальными, если скорости паров находятся в пределах 0,5...1,2 м/с в атмосферных колоннах и 1,5...3,5 м/с – в вакуумных колоннах.

Для колонн с ситчатыми или решетчатыми тарелками провального типа диаметр определяют из условия, чтобы скорости паров в колонне находились в пределах между минимальной и максимальной допустимыми

скоростями, при которых обеспечивается необходимый слой жидкости на поверхности тарелки и в то же время не происходит захлебывания.

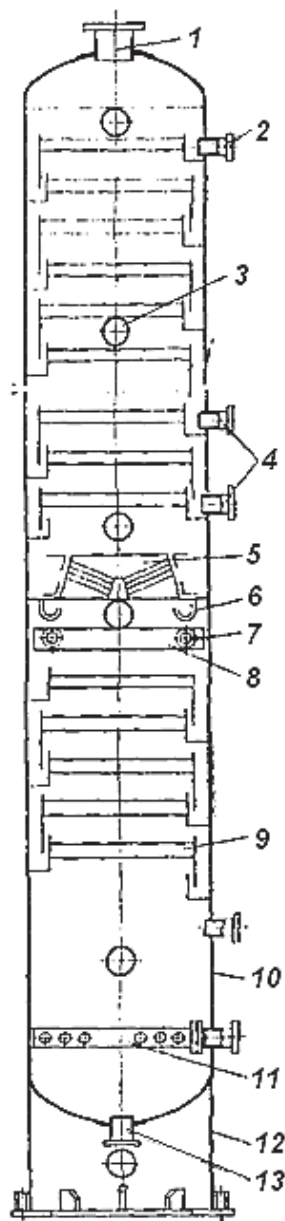


Рис. 2.1. Устройство
ректификационной колонны:
1 – штуцер вывода паров
по шлемовым трубам; 2 – штуцер
верхнего орошения; 3 – люки;
4 – штуцера отбора боковых
погонов; 5 – отбойники;
6 – гидравлический затвор;
7 – штуцера ввода сырья; 8 – улита;
9 – тарелка; 10 – корпус;
11 – трубчатый маточник
для подачи водяного пара;
12 – опора; 13 – штуцер для вывода
нижнего остатка

Высоту колонны находят по числу реальных тарелок и принятому между ними расстоянию, а также по высоте участков, которые приходятся на долю питательной секции и свободных объемов между днищами и первой и последней тарелками. Размеры этих участков принимают в зависимости от конструкции внутренних устройств, возможности их монтажа и ремонта, а также необходимости отбора некоторого количества жидкого остатка внизу колонны [1].

В ректификационных и абсорбционных колоннах применяются тарелки различных конструкций (колпачковые, клапанные, струйные, про-

вальные), существенно различающиеся по своим рабочим характеристикам и технико-экономическим данным. При выборе конструкции контактного устройства учитывают как их гидродинамические и массообменные характеристики, так и экономические показатели работы колонны при использовании того или иного типа контактных устройств.

В настоящее время в промышленности контактные тарелки можно классифицировать:

- по способу передачи жидкости с тарелки на тарелку;
- способу взаимодействия жидкой и паровой (газовой) фаз;
- характеру диспергирования взаимодействующих фаз;
- конструкции устройства для ввода пара (газа) в жидкость.

По способу передачи жидкости различают тарелки со специальными переточными устройствами и тарелки провальные.

У тарелок со специальными переточными устройствами жидкость перетекает с тарелки на тарелку отдельно от потока пара через специальные каналы (рис. 2.2).

В зависимости от нагрузки по жидкости и технологического назначения колонны переток жидкости может осуществляться одним, двумя и более потоками (рис. 2.2, *a – в*). При применении тарелок с большим числом потоков следует учитывать, что при этом уменьшается длина пути жидкости на тарелке и, как следствие, снижается эффективность массопередачи. Колонна разбивается на несколько самостоятельных отсеков, что препятствует перераспределению пара по сечению аппарата в целом и ухудшает равномерность работы тарелок.

В пределах полотна тарелки течение жидкой фазы можно направить по горизонтальной поверхности или по слегка наклонной в сторону слива как в одном уровне, так и каскадом (рис. 2.2, *г*). Применение каскадных тарелок позволяет уменьшить значение градиента уровня жидкости, что обеспечивает в колоннах большого диаметра более эффективную работу тарелок. Однако в этом случае увеличивается расстояние между тарелками и усложняется конструкция полотна.

При низких значениях нагрузки по жидкости обычно используют переливные трубы (рис. 2.2, *д*) или специальные конструкции переливов с кольцевым движением жидкости на тарелке (рис. 2.2, *е*). В последнем случае корпус аппарата и полотно тарелки разделяются вертикальной перегородкой на две части, что позволяет вдвое уменьшить длину сливной перегородки и увеличить нагрузку по жидкости на единицу длины сливной перегородки.

Стремление увеличить производительность колонны по паровой фазе привело к разработке переливных устройств (рис. 2.2, *ж*), оснащенных в месте ввода жидкости на тарелку дополнительной горизонтальной перегородкой, под которой располагаются контактные элементы (отвер-

стия, клапаны). Такая конструкция устраняет «мертвые» зоны под сливным карманом, что позволяет увеличить производительность колонны на 10...20 %.

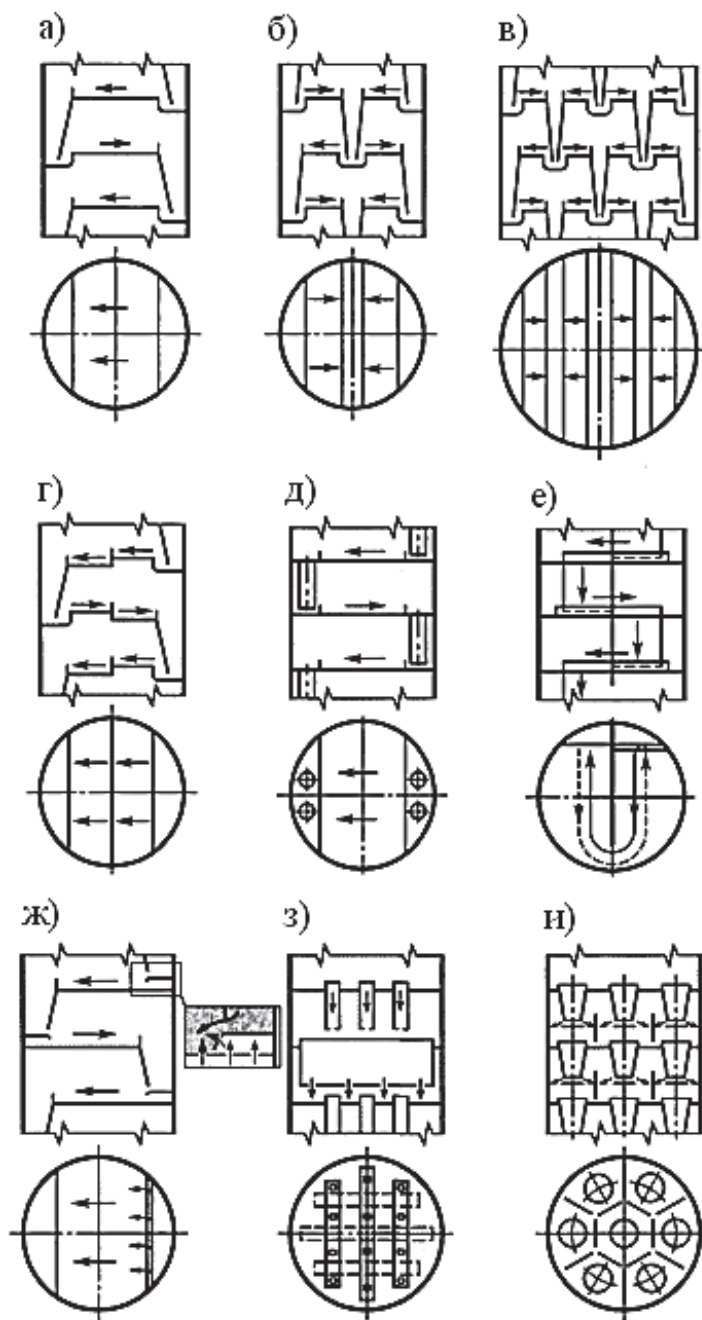


Рис. 2.2. Различные схемы организации движения потока жидкости на тарелках с переливными устройствами: а – однопоточная; б – двухпоточная; в – четырехпоточная; г – каскадная; д – с переливными трубами; е – с кольцевым движением жидкости на тарелке; ж – тарелка NYE фирмы «Glitsch»; з – многосливная тарелка фирмы «Union Carbide Corp.»; и – с двумя зонами контакта фаз

Конструкции тарелок, приведенных на рис. 2.2 (з, и), оснащены специальными переливными устройствами, распределенными по полотну и не достигающими до нижележащей тарелки. Применение таких тарелок целесообразно при повышенных нагрузках по жидкости. Тарелки с двумя зонами контакта фаз (см. рис. 2.2, и) обеспечивают взаимодействие жидкости и пара как в барботажном слое на полотне тарелки, так и в стекающих струях, что увеличивает эффективность массопередачи [3].

Организация движения паровой и жидкой фаз на тарелках провального типа представлена на рис. 2.3 [2].

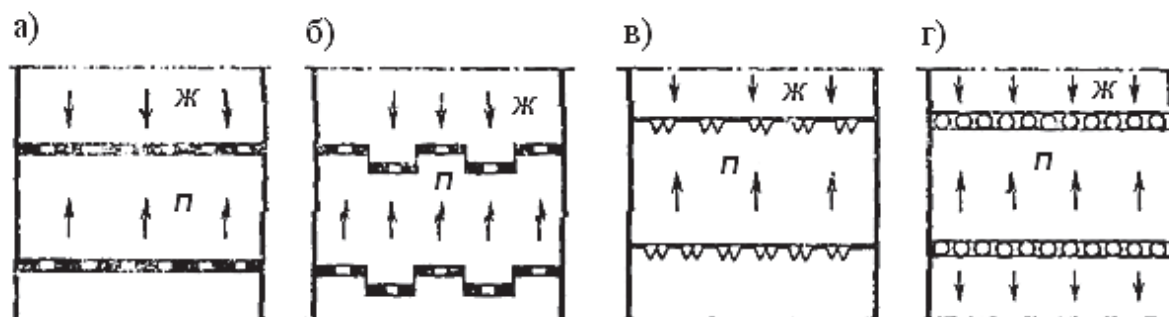


Рис. 2.3. Основные разновидности тарелок провального типа:
а – из плоского листа; б – ступенчатая; в – с отогнутыми
кромками щелей; г – трубчато-решетчатая

По способу взаимодействия жидкой и паровой фаз (рис. 2.4) тарелки делятся:

- на тарелки перекрестного тока (тарелки с переливными устройствами);
- тарелки противотока (провальные тарелки);
- перекрестно-прямоточные контактные устройства;
- скоростные прямоточные тарелки.

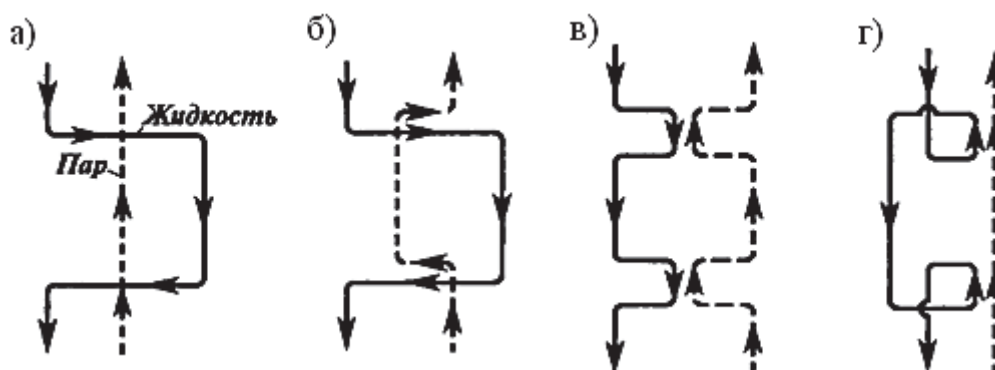


Рис. 2.4. Основные схемы движения пара и жидкости в контактной зоне тарелки: а – перекрестный ток; б – перекрестный прямоток;
в – противоток; г – прямоток

По характеру диспергирования взаимодействующих фаз различают тарелки барботажного и струйного типов. На тарелках пар (газ), диспергируясь на мелкие пузырьки и струи, с большой скоростью проходит через слой жидкости. Образующаяся при этом газожидкостная система называется пеной. Режим взаимодействия фаз, когда пар является дисперсной фазой, а жидкость – сплошной фазой, называется барботажным, а тарелки, реализующие этот режим работы, называются барботажными. У барботажных тарелок элементы контактных устройств (колпачки, клапаны, отверстия) создают в слое жидкости движение пара почти в вертикальном направлении. Барботажный режим имеет место при относительно небольших скоростях пара.

Тарелки барботажного типа могут иметь стесненное или свободное зеркало барботажного (рис. 2.5).

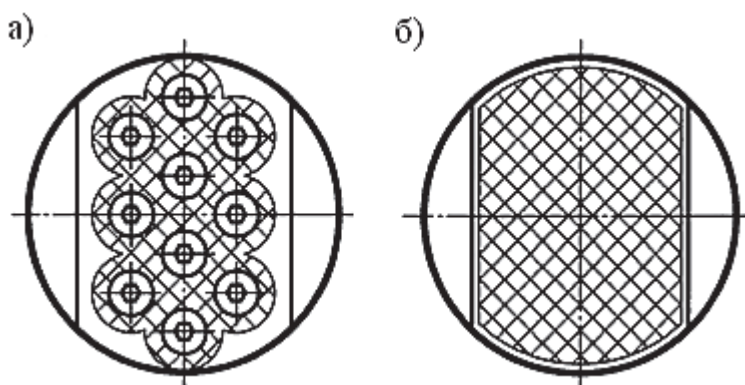


Рис. 2.5. Схемы барботажных тарелок: а – со стесненным зеркалом барботажного; б – со свободным зеркалом барботажного

У тарелок со стесненным зеркалом барботажного часть поверхности жидкости, через которую пар выходит в межтарельчатое пространство, занята контактными устройствами – желобчатыми или круглыми колпачками (примерно 40...75 %), поэтому площадь для выхода пара из жидкости составляет 25...60 % рабочей площади тарелки. У тарелок со свободным зеркалом барботажного устройства для ввода пара в жидкость размещены практически на одном уровне с полотном тарелки (отверстия, клапаны), вследствие чего пар может выходить из слоя жидкости в межтарельчатое пространство практически в любом месте барботажного слоя. Площадь для выхода пара из жидкости в этом случае составляет 70...90 % рабочей площади тарелки.

При больших скоростях пара дисперсной фазой становится жидкость, а пар – сплошной фазой. Контакт между фазами осуществляется на поверхности капель и струй жидкости, движущихся в межтарельчатом пространстве с большой скоростью. Этот режим называется струйным, а

контактные устройства, основанные на этом принципе взаимодействия фаз, – струйными.

Струйные тарелки создают прямоточное движение фаз в пределах всей тарелки или отдельных ее участков при высоких скоростях движения пара (рис. 2.6). Необходимо отметить, что при реализации чистого прямоточного движения контактирующих фаз несмотря на значительное повышение производительности аппарата эффективность такого взаимодействия в пределах отдельного контактного элемента обычно невысока и ограничена условиями достижения равновесия на выходе из области контактной зоны, где осуществляется прямоток фаз. Для повышения общей эффективности взаимодействия контактирующих фаз прибегают к различным способам локализации (компенсации) прямотока.

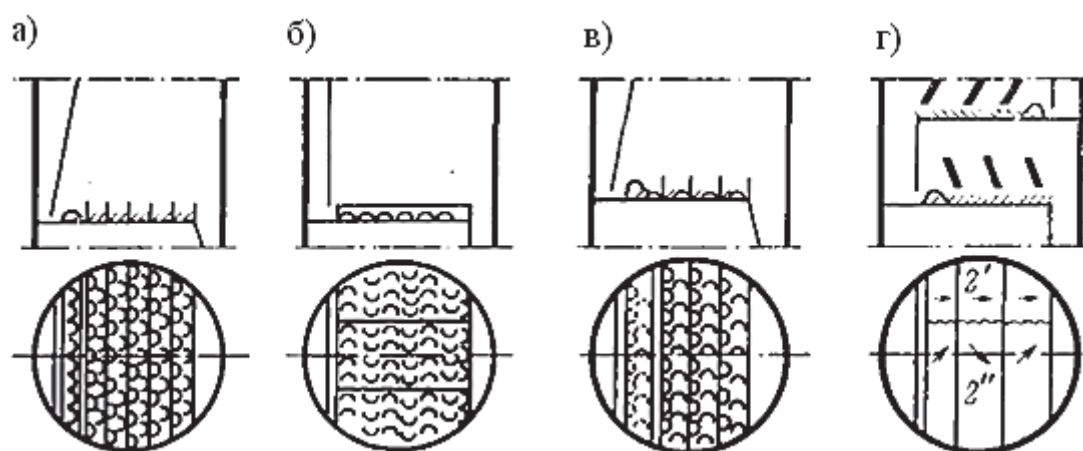


Рис. 2.6. Некоторые типы струйных тарелок: а – с вертикальными поперечными перегородками и вводом пара в направлении течения жидкости; б – с продольными перегородками и вводом пара перпендикулярно направлению течения жидкости; в – с вводом пара вдоль и поперек направления течения жидкости; г – с прямоточно-пересекающимися направлениями движения жидкости и пара

В зависимости от конструкции устройств для ввода пара в жидкость различают ситчатые (дырчатые), колпачковые, клапанные, язычковые (чешуйчатые) и другие типы тарелок.

Направление ввода газа (пара) в жидкость и характер взаимодействия фаз в зоне контакта оказывают существенное влияние на производительность и эффективность работы тарелки, а также на зависимость эффективности тарелки от нагрузки по пару.

Для повышения производительности тарелки используют контактирование фаз в прямотоке, а для повышения эффективности взаимодействия

фаз предпочитают перекрестный ток или противоток. Оптимальное сочетание указанных характеристик обеспечивает реализацию наиболее высоких эксплуатационных показателей тарельчатых контактных устройств [3].

При оценке конструкций тарелок обычно принимают во внимание следующие показатели:

- производительность по жидкости L , $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, рассчитанную на площадь свободного сечения колонны;
- производительность по пару, или F -фактор пара, $(\text{м}/\text{с}) \cdot (\text{кг}/\text{м}^3)^{-0,5}$;
- эффективность контактного устройства, которую для тарельчатых аппаратов оценивают через КПД по Мерфи;
- гидравлическое сопротивление контактных устройств Δp , Па, характеризующее энергетические затраты на проведение процесса;
- диапазон устойчивой работы контактного устройства [4];
- сопротивление одной теоретической тарелки при разных рабочих нагрузках;
- возможность работы на средах, склонных к образованию инкрустаций, полимеризации;
- простоту конструкции, проявляющуюся в трудоемкости изготовления, монтажа, ремонтов;
- металлоемкость [2].

Важной характеристикой тарелки является диапазон рабочих нагрузок n , равный отношению максимальной и минимальной допустимых скоростей пара в колонне. Чем больше величина n , тем большие колебания нагрузок по жидкой и паровой фазам можно допустить в условиях эксплуатации аппарата с тем или иным типом контактных устройств.

На рис. 2.7 показана область устойчивой работы контактных тарелок с переливными устройствами.

Максимально допустимая скорость пара в колонне (линия BC) определяется величиной допустимого уноса жидкости, которая обычно принимается равной 10 %. Линия AD определяет минимально допустимые скорости пара, соответствующие 10 % провалу жидкости. Справа область устойчивой работы ограничена линией CD , которая соответствует максимальным нагрузкам по жидкости, соответствующим 85 % режима «захлебывания». Линия AB определяет минимальные нагрузки по жидкости, при которых на тарелке обеспечивается устойчивый барботажный слой и отсутствует «проскок» пара. Нагрузки по пару и жидкости, соответствующие координатам любой точки внутри области, обеспечивают устойчивую работу аппарата.

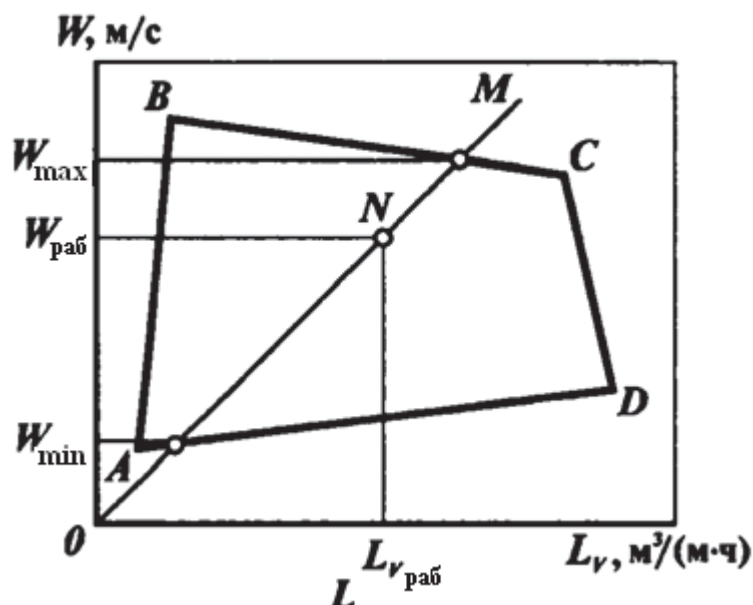


Рис. 2.7. Область устойчивой работы тарелки

Линия OM , соединяющая рабочую точку N с началом координат, называется рабочей линией процесса. Пересечение рабочей линии OM с прямыми, ограничивающими область устойчивой работы тарелки, позволяет определить максимальную и минимальную допустимую скорость пара в колонне.

В табл. 2.1 представлены диапазоны нагрузок n для тарелок некоторых типов [3].

Таблица 2.1

Диапазоны нагрузок n для тарелок некоторых типов

Тип тарелки	Значение n
Колпачковые с круглыми колпачками	4...5
Струйные с вертикальными перегородками	3...3,5
Из S-образных элементов	2,5
Решетчатые провального типа	2
Клапанные	>4

2.1. Колпачковые тарелки

К колпачковым относятся ректификационные тарелки с круглыми колпачками, с желобчатыми и из S-образных элементов.

Колпачковые тарелки предназначены для создания возможно лучшего контакта между парами и жидкостью и поэтому должны иметь развитую поверхность контакта. При этом следует избегать создания больших гидравлических сопротивлений поднимающимся по колонне парам. В

настоящее время находятся в эксплуатации тарелки различных конструкций, отличающиеся устройством и принципом работы. Принцип работы тарелки характеризуется способом контакта паров с жидкостью и движением жидкости как по поверхности тарелки, так и от тарелки к тарелке вниз по колонне [2].

Рассмотрим особенности работы барботажной тарелки на примере колпачковой тарелки с круглыми колпачками, схема которой приведена на рис. 2.8.

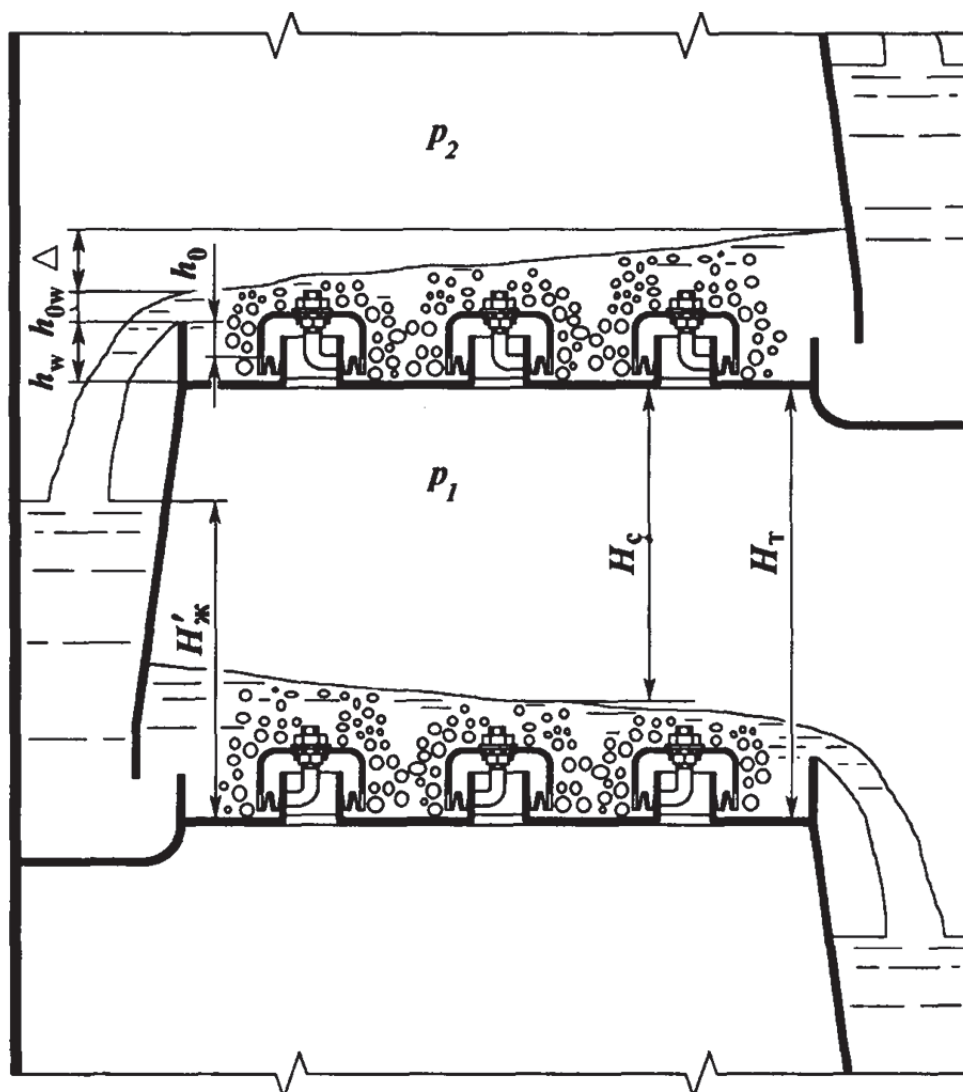


Рис. 2.8. Схема работы барботажной тарелки

Жидкость поступает на полотно тарелки из переливного устройства и течет от приточной стороны тарелки к сточной, при этом на тарелке возникает градиент уровня жидкости. Стенка переливного устройства погружена в жидкость, находящуюся на нижележащей тарелке, что обеспечивает в колонне соответствующий гидравлический затвор, исключая-

щей возможность прохождения паров через переливное устройство. Величина заглубления должна быть больше 30 мм. Уровень жидкости $H'_ж$ в переливном устройстве выше уровня жидкости на тарелке, что обеспечивает необходимый расход жидкости.

Высота слоя жидкости на полотне тарелки определяется высотой сливной перегородки h_w и подпором жидкости над гребнем слива h_{ow} . Изменяя высоту сливной перегородки, можно регулировать уровень жидкости на тарелке.

Вследствие разности давлений $p_1 > p_2$ между двумя смежными тарелками и наличия гидравлического затвора в переливном устройстве поток паров направляется через паровые патрубки под колпачки и через прорези в его нижних кромках поступает в слой жидкости на тарелке. При барботаже (прохождении газа (пара) сквозь слой жидкости) осуществляется контакт между фазами и протекает процесс массообмена между ними.

На рис. 2.9 представлена схема барботажа газа в зоне контакта с жидкостью.

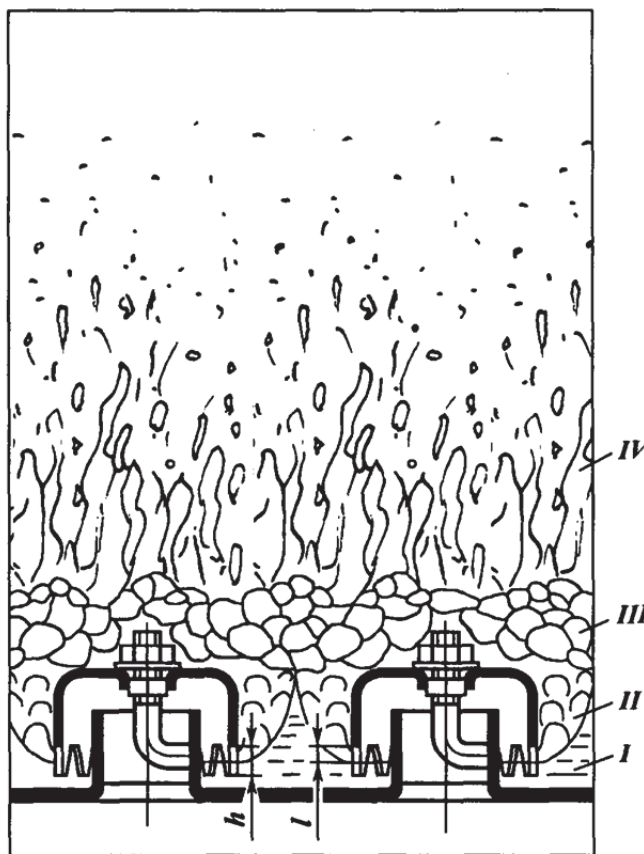


Рис. 2.9. Схема барботажа газа через жидкость

Данному рабочему режиму соответствует определенная степень открытия прорезей колпачков, которая обеспечивает пропуск паров, при-

ходящихся на одну прорезь. При этом уровень жидкости под колпачком ниже, чем на полотне тарелки.

Поток паров при поступлении в слой жидкости прорезями колпачков разбивается на большое число отдельных струй, которые с большой скоростью входят в жидкость. В пространстве между смежными колпачками паровые и жидкостные струи, сталкиваясь, деформируются, образуя слой газожидкостной системы (пены) с сильно развитой поверхностью контакта фаз.

Пространство между смежными колпачками может быть разбито на следующие основные зоны (см. рис. 2.9):

- небарботируемой жидкости (зона I);
- недеформируемых струй (зона II);
- деформируемых струй – пены (зона III);
- парового пространства с взвешенными каплями жидкости (зона IV).

Зона небарботируемой жидкости I образуется между полотном тарелки и нижней границей открытых прорезей. Непосредственно через этот слой жидкости пар не проходит, поэтому массообмен в этой зоне малоэффективен. Он обусловлен главным образом молекулярной диффузией в слое жидкости, а также перемешиванием жидкости вследствие наличия градиента давления.

Для уменьшения высоты зоны небарботируемой жидкости следует более глубоко погружать колпачки в жидкость, оставляя зазор между нижним обрезом прорезей колпачков и дном тарелки не более 5...10 мм. При этом паровая нагрузка, приходящаяся на одну прорезь, должна быть такой, чтобы обеспечить по возможности более полное открытие прорези, включая случай $l > h$.

Обычно колпачки устанавливаются по высоте так, чтобы верхний край их прорезей был погружен в жидкость на 20...50 мм, в зависимости от режима работы. Диаметр колпачков обычно 60 или 80 мм, прорези высотой 15, 20 или 30 мм.

К зоне недеформируемых струй II относится часть пространства между колпачками от места выхода паровых струй из прорезей колпачков до места столкновения струй, выходящих из двух смежных колпачков. В этой зоне поверхность контакта фаз обусловлена в основном поверхностью струй. Высота этой зоны зависит от расстояния между колпачками и скорости выхода пара (газа) из прорезей колпачков.

С увеличением скорости паров в прорезях колпачков увеличивается вылет газовой струи в жидкость и сокращается путь струй до момента их столкновения, что приводит к уменьшению высоты зоны недеформируемых струй.

Уменьшение расстояния между колпачками также приводит к сокращению зоны недеформируемых струй. Однако чрезмерное уменьше-

ние этого расстояния затрудняет движение жидкости по тарелке, увеличивает градиент уровня жидкости Δ и может привести к повышению уноса жидкости с тарелки потоком паров вследствие увеличения скорости выхода паров из жидкости между колпачками в зоне барботажа.

Для зоны пены III характерны наиболее развитая поверхность контакта и наиболее эффективный массообмен. Высота зоны пены возрастает с увеличением слоя жидкости на тарелке и скорости потока паров. Высота слоя пены на тарелке зависит от физических свойств жидкости, характеризующих ее способность к пенообразованию (поверхностное натяжение, плотности фаз). Вместе с тем необходимо иметь в виду, что при увеличении высоты слоя пены увеличивается гидравлическое сопротивление движению потока паров и вследствие уменьшения высоты сепарационного пространства H_c (расстояния от поверхности пены до вышележащей тарелки) возрастает унос жидкости на вышележащую тарелку. При максимальных рабочих нагрузках высота сепарационного пространства не должна быть меньше 100...150 мм.

В межтарельчатое сепарационное пространство вместе с потоком паров попадают капли жидкости различных размеров. Крупные капли, вследствие того что скорость паров в межтарельчатом пространстве меньше их скорости витания, как правило, под действием силы тяжести вновь возвращаются в слой жидкости. Мелкие капли, скорость витания которых меньше скорости движения паров в межтарельчатом пространстве, а также часть крупных капель, получивших большую начальную скорость, транспортируются потоком паров на вышележащую тарелку, что и приводит к их уносу. Концентрация капель жидкости в межтарельчатом пространстве убывает в направлении движения паров. Поверхность контакта фаз в сепарационном пространстве барботажных тарелок в основном определяется поверхностью капель жидкости, вклад которой в массообмен незначителен.

Для нормальной работы барботажной тарелки должно быть обеспечено равномерное распределение потока паров по всей рабочей площади тарелки, т.е. гидравлическое сопротивление каждого контактного элемента (колпачка, клапана, отверстия) должно быть одинаковым. Этого можно достичь погружением контактных элементов в слой жидкости на одну и ту же глубину. Если высота слоя жидкости на тарелке меняется незначительно, что характерно для колонн относительно небольшого диаметра (обычно менее 1 м), то колпачки могут быть установлены на одном горизонтальном уровне. Для колонн большого диаметра и при значительных расходах жидкости, когда высота слоя жидкости на тарелке существенно меняется (более 10 мм), применяют разный уровень установки колпачков (более высокий у колпачков, расположенных ближе к входу жидкости на тарелку). Кроме того, устраивают несколько каскадов по пути движения жидкости или делят общий поток жидкости на несколько потоков [3].

Тарелки с круглыми колпачками. Известны неразборные (сварные) и разборные (составные) конструкции тарелок с круглыми колпачками. Они представляют собой диски, в которых установлены сквозные стаканы (ниппели), выступающие над их поверхностью. Каждый стакан накрыт колпачком так, чтобы обеспечить свободное прохождение паров.

Конструкция сварных тарелок проста: диск, изготовленный из листовой стали, приваривается непосредственно к корпусу колонны или опорным уголкам. Секции разборной тарелки, ширина которых не более 400 мм (для затаскивания их через стандартный люк), внутри колонны соединяются болтами и прикрепляются к опорным полкам, приваренным к корпусу колонны.

Кроме стаканов диски тарелок снабжены сливными трубами для стока флегмы на нижележащую тарелку. Сливные трубы и стаканы-ниппели крепят в гнездах диска тарелки сваркой либо развальцовкой.

Колпачки устанавливаются над ниппелями индивидуально или гирляндами по несколько колпачков вместе (рис. 2.10). Конструкция крепления колпачков должна обеспечивать регулирование высоты расположения их над плоскостью тарелки.

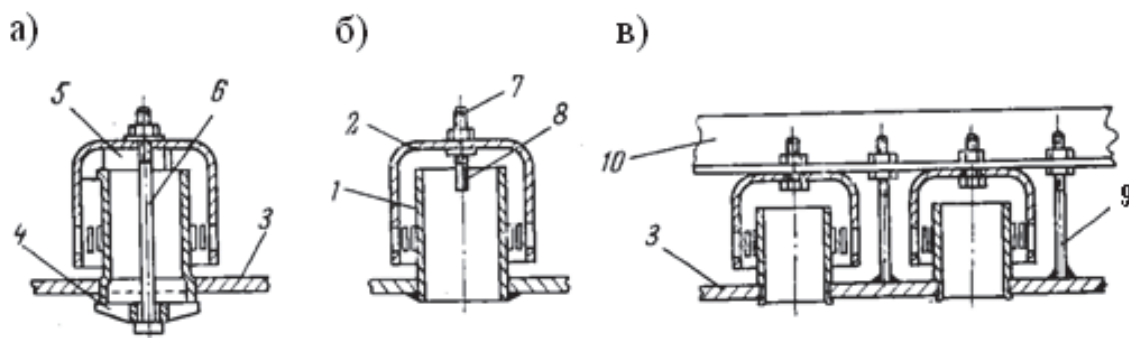


Рис. 2.10. Типы крепления колпачков: а, б – индивидуальные крепления; в – крепление групповое (гирляндой); 1 – стакан; 2 – колпачок; 3 – диск тарелки; 4 – трубка; 5, 8 – планки; 6 – болт; 7 – шпилька; 9 – штырь; 10 – несущий уголок

Тарелки с круглыми колпачками в эксплуатационном отношении отличаются от других колпачковых тарелок наибольшей универсальностью: они работают в широких диапазонах нагрузок [2].

Тарелки с капсульными колпачками имеют относительно высокий КПД (0,75...0,80). Их можно использовать при нестабильных нагрузках по жидкости и пару. Для них $F = 1 \text{ (м/с)} \cdot (\text{кг/м}^3)^{-0,5}$, а гидравлическое сопротивление, зависящее от глубины погружения колпачка, не превышает 1 кПа. К недостаткам этих тарелок относятся значительные металлоемкость и трудоемкость изготовления [4].

Тарелки из S-образных элементов. На тарелках этого типа желоба и колпачки образуются при сборке S-образных элементов с одинаковым поперечным сечением (рис. 2.11).

Сборку производят таким образом, чтобы колпачковая часть элемента покрывала желобчатую часть соседнего, образуя замок для гидравлического затвора при работе тарелки.

S-образные элементы снабжены трапециевидными прорезями для увеличения поверхности контактирования.

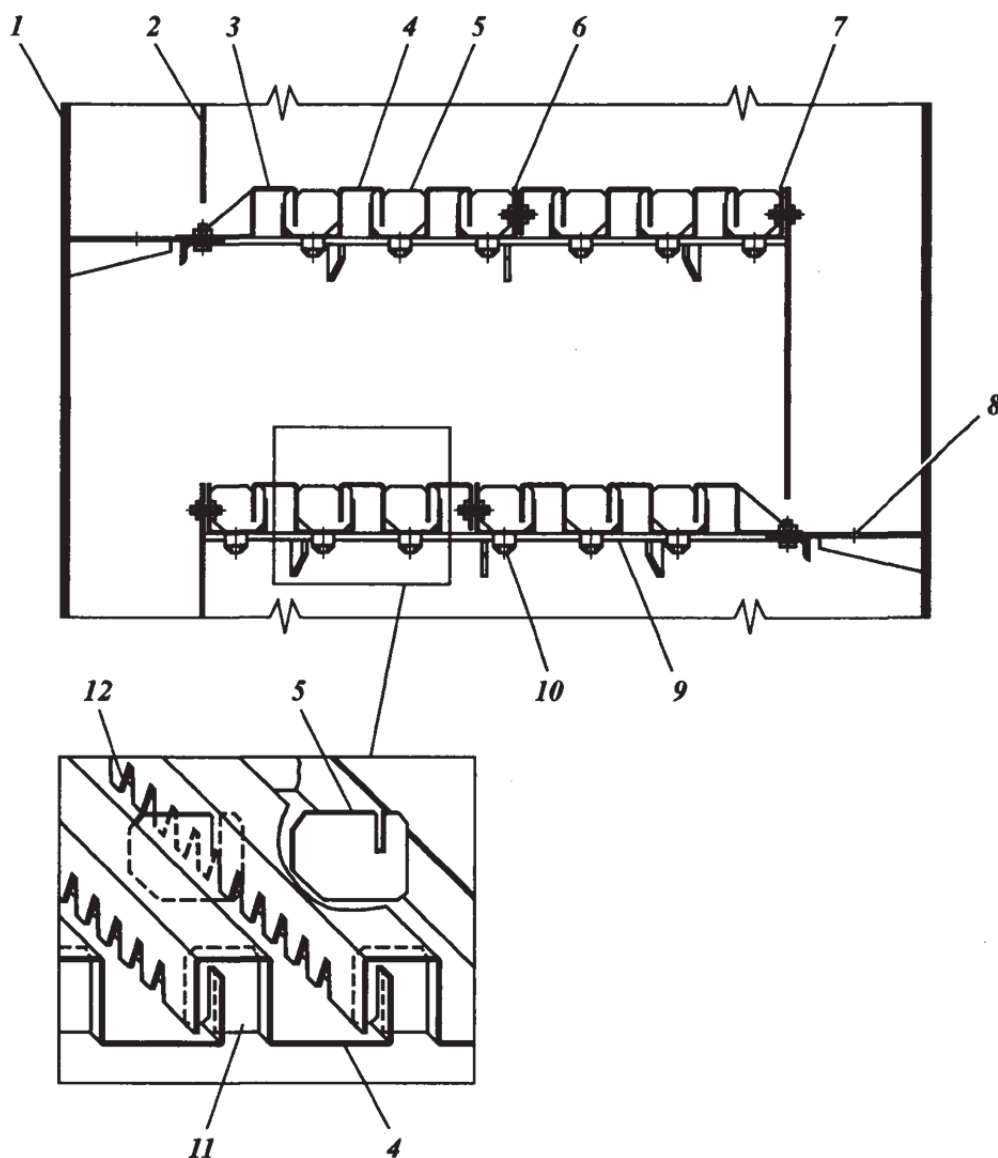


Рис. 2.11. Конструкция тарелки из S-образных элементов: 1 – корпус колонны; 2 – сливная перегородка; 3 – паровой элемент; 4 – S-образный элемент; 5 – поперечные перегородки; 6 – съемный S-образный элемент; 7 – жидкостный элемент; 8 – отверстие для слива жидкости; 9 – опорное кольцо; 10 – трубочина; 11 – заглушки; 12 – прорези в S-образных элементах

В начале тарелки установлен паровой элемент 3, у слива с тарелки – жидкостный элемент 7. Вертикальная стенка части S-образного элемента 4, выполняющая роль колпачка, снабжена трапецевидными прорезями 12. Паровая часть S-образного элемента с торцов перекрыта заглушками 11, препятствующими выходу пара в этом направлении. Для повышения жесткости конструкции и упрощения монтажа тарелки по длине S-образных элементов привариваются поперечные перегородки 5. При большом числе элементов вдоль потока жидкости в середине тарелки предусматривают разъемный S-образный элемент, что позволяет начинать разборку тарелки также и в средней части. Профиль S-образного элемента имеет повышенную жесткость, что позволяет изготавливать их из стального листа толщиной 2 мм и при диаметре колонны до 4000 мм не применять промежуточных опорных балок [3].

Жидкость по тарелке движется под напором пара, выходящего из прорезей колпачковых частей, направленных в одну сторону. Потери напора на тарелках из S-образных элементов значительны, поэтому применение их в вакуумных колоннах нецелесообразно [2]. Металлоемкость тарелок с S-образными элементами почти вдвое меньше, а производительность на 20...30 % выше, чем у тарелок с капсульными колпачками. Эффективности сравниваемых тарелок примерно одинаковы (КПД 0,6...0,8). Оптимальная нагрузка по пару для этой тарелки на 10...25 % меньше, чем для колпачковой. Для расширения диапазона устойчивой работы и повышения производительности таких тарелок S-образные элементы 2 (рис. 2.12) снабжают прямоточными клапанами 1 прямоугольной формы, размещенными на верхней площадке S-образного элемента. С целью увеличения жесткости тарелки устанавливаются пластины 3. По производительности эти тарелки примерно на 10 % превосходят клапанные прямоточные [4].

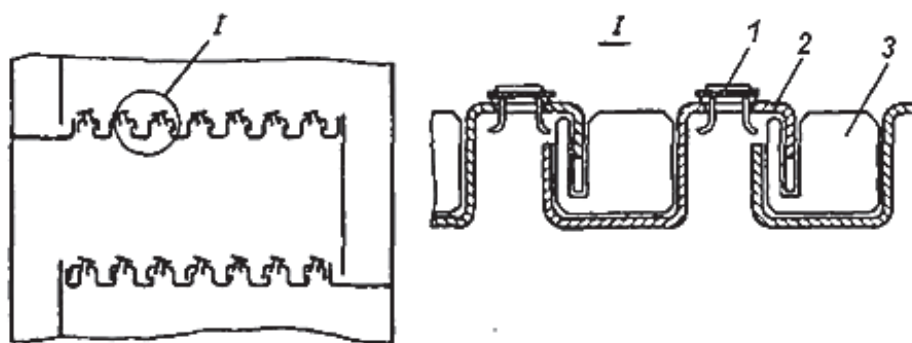


Рис. 2.12. Конструкция тарелки с S-образными элементами и клапанами

Тарелки с желобчатыми колпачками. Схема тарелки с желобчатыми колпачками приведена на рис. 2.13.

В поперечное сечение колонны вписан прямоугольник или квадрат, который отделяет от него четыре сегмента: два глухих сегмента, один –

карман данной тарелки и один – сливное устройство. К глухим сегментам 2 с отбортовкой вниз приварены полужелоба 3, которые одновременно сидят на опорных уголках 6, также приваренных торцами к глухим сегментам. Каждый опорный уголок по всей длине приварен к вертикальной стенке кармана 13 или к сливной перегородке 14. Для их прочного соединения используют уголки 7, 8, 12. Опорные уголки снабжены специальными полукруглыми выточками, на которые устанавливают концы желобов 4. Для обеспечения герметичности в пазы этих выточек помещают прокладку из асбестового шнура.

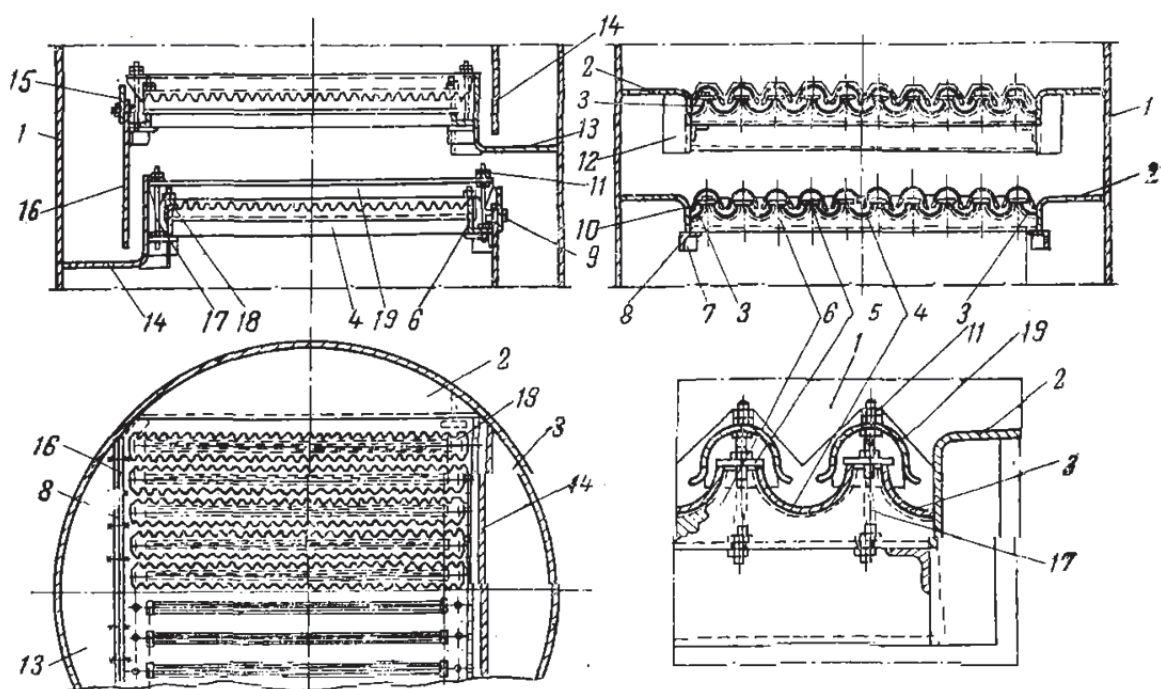


Рис. 2.13. Конструкция тарелки с желобчатыми элементами: 1 – корпус колонны; 2 – глухие сегменты; 3 – полужелоба; 4 – желоб; 5 – прямоугольная шайба; 6 – опорный уголок; 7, 8, 12 – уголки; 9 – болт для крепления сливной планки; 10 – гайка для крепления желоба; 11 – гайка; 13 – карманы; 14 – сливная перегородка; 15 – сливная планка; 16 – сливная перегородка; 17 – шпилька для крепления колпачка; 18 – шпилька для крепления желоба; 19 – колпачок

Каждую пару желобов или желоб с полужелобом плотно сажают в гнезда и удерживают в них шпилькой 18, приваренной к середине вершин опорного уголка, прямоугольной шайбой 5 и гайкой 10. Шпильки 17 устанавливают на горизонтальной полке опорного уголка с помощью двух гаек 11. Колпачок 19 монтируют на нужной высоте и закрепляют двумя такими же гайками 11. Высоту можно менять, регулируя положение нижней гайки.

Колпачки снабжены трапецевидными вырезами по нижним крамкам для увеличения поверхности контакта паров и жидкости.

Уровень жидкости на тарелках устанавливается регулируемой по высоте сливной планкой 15, прикрепленной болтами к сливной перегородке 14. Для этого сливная планка снабжена продолговатыми вырезами, в пределах которых она может перемещаться по высоте относительно осей болтов 9. Жидкость поступает на тарелку через треугольные вырезы верхней кромки кармана 13. Благодаря этим вырезам жидкость распределяется по всем желобам данной тарелки равномерно, с одинаковой интенсивностью.

Основными эксплуатационными недостатками желобчатых тарелок являются в малая площадь барботажа и неполное использование площади поперечного сечения колонны для создания зеркала барботажа.

Колпачки тарелки регулируют по высоте с учетом нагрузки колонны по жидкости, чтобы не допустить чрезмерных гидравлических сопротивлений. Регулировку производят с помощью гаек 11, перемещая их по шпильке 17 [2].

2.2. Бесколпачковые тарелки

Конструктивно бесколпачковые тарелки представляют собой ситчатые или решетчатые диски. Они могут быть со сливными устройствами и без них.

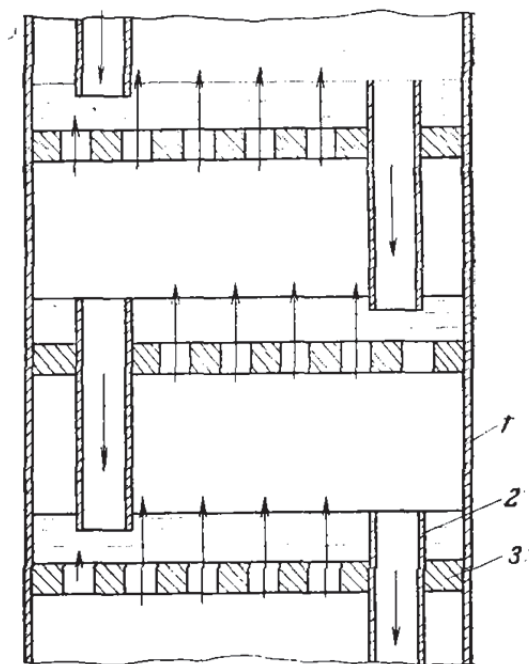


Рис. 2.14. Схема работы ситчатой тарелки:
1 – корпус; 2 – сливная труба; 3 – ситчатая тарелка

Ситчатые тарелки. Схема ситчатой тарелки со сливными устройствами показана на рис. 2.14.

Поток паров, движущихся снизу, пройдя через множество отверстий на тарелке, делится на мелкие струйки. Напором этих струек на тарелке поддерживается слой флегмы, через который барботируют пары. Высота слоя тем больше, чем больше напор паров. Сливные устройства регулируют так, чтобы не допустить поднятия уровня жидкости на тарелке выше расчетного (обычно 30...100 мм) [1].

Ситчатые тарелки со сливным устройством применяют в колонных аппаратах диаметром 400...4000 мм при расстоянии между тарелками 200 мм и более. Основным элементом таких тарелок – металлический диск с отверстиями диаметром 2...6 мм, расположенными по вершинам равно-сторонних треугольников (рис. 2.15).

В колоннах диаметром более 800 мм тарелки состоят из отдельных секций. По креплению секций тарелки к корпусу и устройству переливов такие колонны аналогичны аппаратам с колпачковыми и клапанными тарелками. Преимущество ситчатой тарелки – большое свободное (т.е. занятое отверстиями) сечение тарелки, следовательно, высокая производительность по пару (газу) – на 30...40 % больше, чем у колпачковых, простота изготовления, малая металлоемкость. Недостаток – высокая чувствительность к точности установки. Аппараты с ситчатыми тарелками не рекомендуется использовать для работы на загрязненных средах, что может вызвать забивание отверстий.

Для уменьшения гидравлического сопротивления и расширения диапазона устойчивой работы ситчатых тарелок их комбинируют с клапанными устройствами (рис. 2.16). В результате повышается эффективность работы тарелки при малой и большой производительности по пару.

При малых нагрузках тарелка работает как обычная ситчатая, с увеличением нагрузки открывается клапан 1 и между клапаном и тарелкой 2 образуется щель, откуда под некоторым углом к горизонтали выходит пар, обеспечивая перемещение жидкости по тарелке в направлении

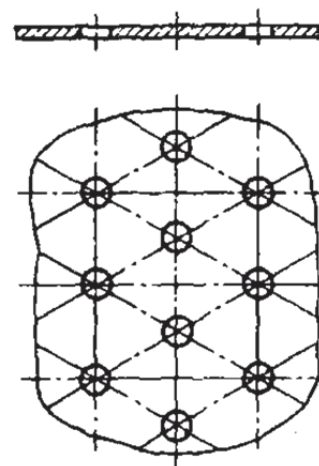


Рис. 2.15. Элемент ситчатой тарелки

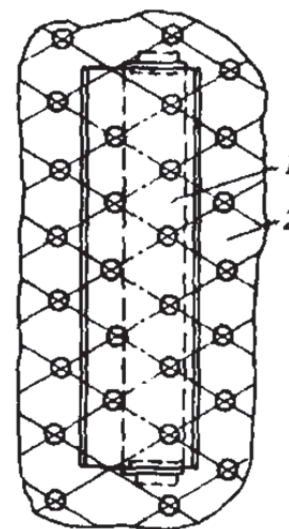


Рис. 2.16. Элемент ситчато-клапанной тарелки: 1 – клапан; 2 – тарелка

слива и уменьшая разность уровней жидкости на тарелке. Ситчатоклапанная тарелка обеспечивает большой диапазон устойчивой работы при небольшом гидравлическом сопротивлении, вследствие чего она пригодна для процессов, протекающих под вакуумом.

В колонных аппаратах диаметром 1200...4000 мм используют ситчатые тарелки с просечно-вытяжными отверстиями (рис. 2.17).

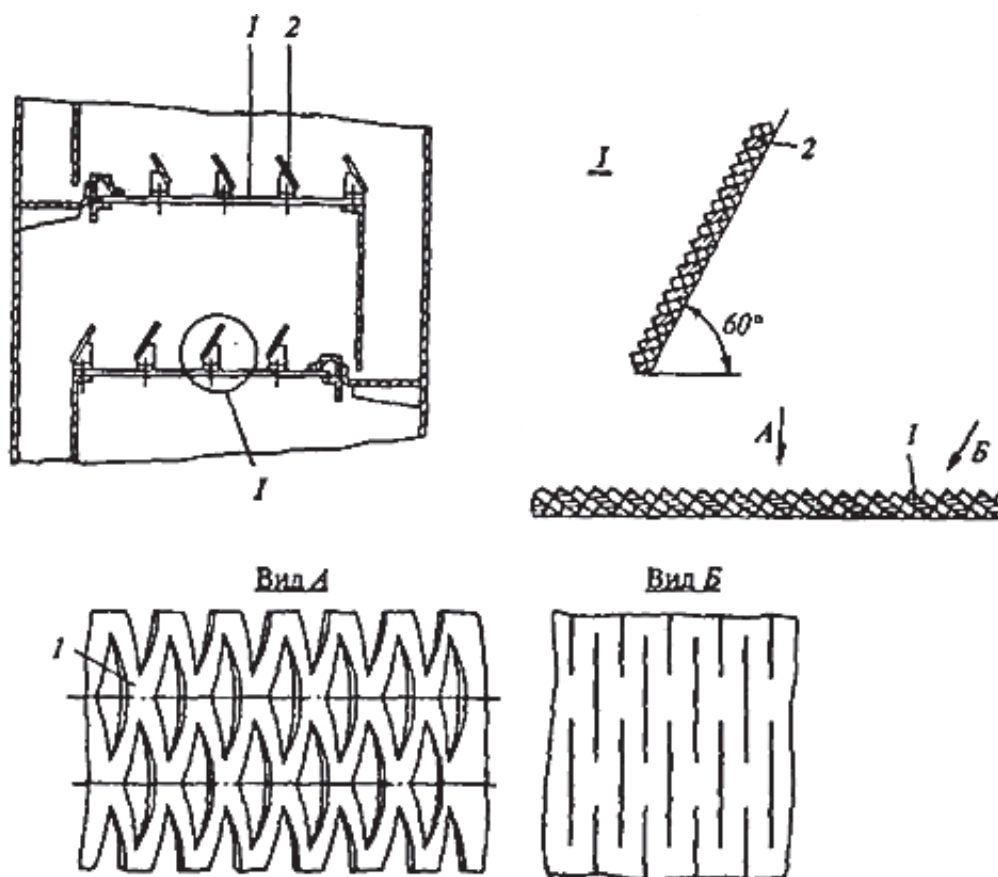


Рис. 2.17. Конструкция тарелки с просечно-вытяжными отверстиями:
1 – секция тарелки; 2 – отбойник

Такие тарелки состоят из отдельных секций 1, изготовляемых из листа толщиной 2...3 мм, с просечно-вытяжными отверстиями. Тарелка работает как струйная прямоточная. Для уменьшения брызгоуноса над тарелкой под углом 60° устанавливают отбойные элементы 2.

Тарелка будет обладать невысоким гидравлическим сопротивлением, если свободное сечение тарелки, выбираемое из условия отсутствия «провала» жидкости, достаточно велико (не менее 30 % сечения колонны). Поэтому такие тарелки используют в вакуумных колоннах. Минимальное расстояние между тарелками в колонне 450 мм [4].

Тарелки провального типа (рис. 2.18) перекрывают всё сечение колонны и состоят из отдельных секций, укрепленных на опорном кольце

и балках каркаса. Для прохода паровой и жидкой фаз выполнены отверстия или прорезы, площадь которых составляет 10...30 % площади всей тарелки. Решетчатые провальные тарелки используют в установках, рабочая производительность которых отклоняется от расчетной не более чем на 25 %.

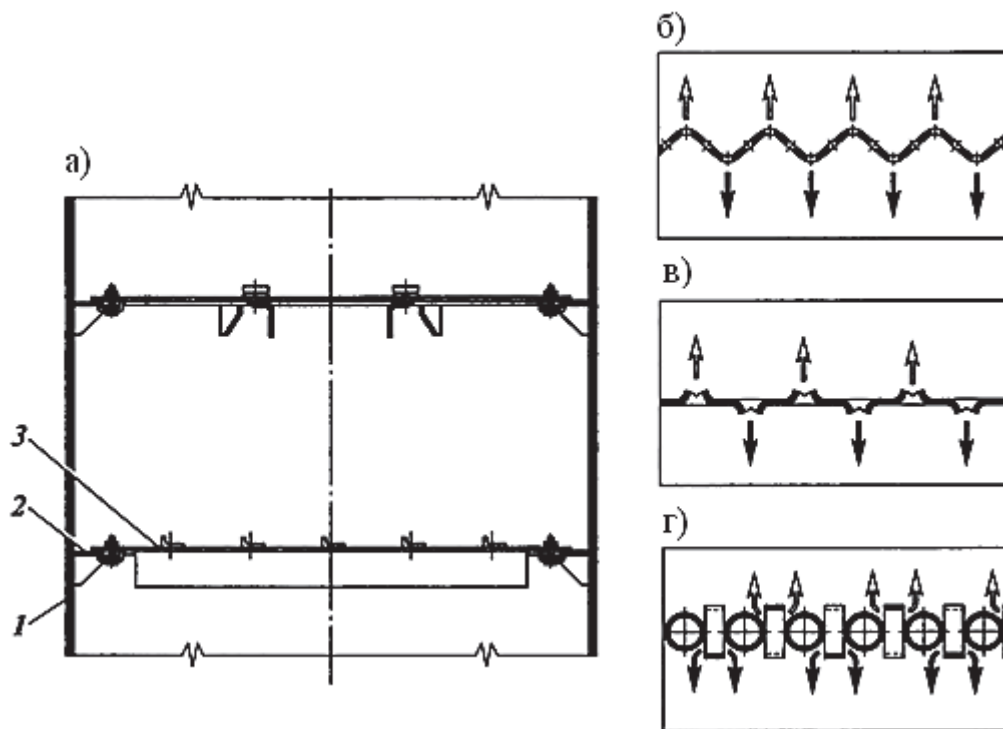


Рис. 2.18. Схемы тарелок провального типа: а – решетчатая тарелка; б – ситчатая волнистая тарелка; в – решетчатая тарелка с отогнутыми кромками щелей; г – трубчато-решетчатая тарелка, оснащенная гофрированной лентой; 1 – корпус колонны; 2 – опорное кольцо; 3 – секция полотна тарелки

На тарелках провального типа паровая и жидкая фазы контактируют по схеме противотока, благодаря чему происходит интенсивное перемешивание жидкости по всей высоте контактной зоны. Пар и жидкость проходят через одни и те же каналы, при этом места стока жидкости и прохода паров случайным образом перемещаются по площади тарелки [3].

Конструктивно тарелка представляет собой плоский, перекрывающий все сечение колонны диск с выштампованными в нем прямоугольными щелями, уложенный на опорную конструкцию. Обычно площадь прорезей составляет 10...30 % всей площади тарелки. Прорезы (как правило, размерами 4×60 мм) располагаются на поверхности тарелки с шагом $t = 10...36$ мм.

К преимуществам этих тарелок следует прежде всего отнести простоту конструкции и малую металлоемкость, большую пропускную спо-

собность по жидкости; при достаточной ширине щели они могут быть использованы для обработки загрязненных жидкостей, т.к. осадок остается на тарелке [4].

Тарелки этого типа гораздо более чувствительны к изменению нагрузок по жидкости и пару и имеют более узкий диапазон рабочих нагрузок n , чем тарелки со специальными переливными устройствами. При небольшой паровой нагрузке напор паров недостаточен для образования слоя жидкости на тарелке. При больших паровых нагрузках сопротивление течению жидкости через отверстия тарелки становится столь значительным, что пена заполняет практически все межтарельчатое пространство и нормальный переток жидкости с тарелки на тарелку нарушается. При этом резко возрастает гидравлическое сопротивление потоку паров. Такой режим работы называется захлебыванием и определяет предельные паровую и жидкостную нагрузки колонны.

Для увеличения производительности и эффективности провальных тарелок за счет более равномерного распределения потоков по сечению колонны применяют ситчатые волнистые тарелки (рис. 2.18, б), решетчатые тарелки с отогнутыми кромками щелей (рис. 2.18, в). Представляет интерес трубчато-решетчатая тарелка (рис. 2.18, г), полотно которой набирают из труб, расположенных параллельными рядами. В зазоре между трубами расположена гофрированная стальная лента, ширина которой равна величине зазора. Пар проходит через зазор между трубами в местах, где горизонтальные участки ленты выступают над поверхностью труб, т.к. сопротивление на этих участках минимально. В тех местах, где горизонтальные участки ленты расположены под трубами, проходит жидкость. В случае необходимости отвода (подвода) тепла по трубам может быть пущен хладагент (теплоноситель).

2.3. Клапанные тарелки

Клапанные тарелки представляют собой цельные или собранные из нескольких секций диски, в которых имеются продолговатые щели либо круглые отверстия. Щели прикрываются пластинчатыми клапанами, а отверстия – круглыми. Клапаны установлены свободно и удерживаются скобами, приваренными к поверхности тарелки.

В зависимости от напора паров клапаны приподнимаются на различную высоту в пределах, определяемых высотой удерживающих скоб. На некоторых тарелках колпачки не накрываются удерживающими скобами, а снабжаются рождками, которые при подъеме клапана упираются в нижнюю поверхность тарелки.

В отличие от тарелок, работающих в статическом режиме, клапанные тарелки работают в динамическом режиме. В зависимости от напора

восходящих по колонне паров клапаны поднимаются на соответствующую величину (обычно на 4...10 мм), регулируя тем самым площадь свободного сечения тарелки. Это позволяет поддерживать скорость паров примерно постоянной при изменении общей нагрузки на колонну, т.е. осуществлять наилучший режим ректификации.

Конструкция удерживающих скоб и клапанов такова, что обеспечивается их подъем с наклоном к поверхности тарелок и, следовательно, лучший барботаж паров через флегму на тарелке. Для большего повышения эффективности массообмена клапаны можно снабжать тангенциально расположенными щелями; выходящие через них пары будут вращать клапан.

Важным эксплуатационным показателем клапанных тарелок является вес каждого клапана, который подбирают таким образом, чтобы при возможных колебаниях нагрузок клапан работал в заданном диапазоне подъема. В тех случаях, когда возможны очень большие изменения нагрузок, тарелки снабжают одновременно клапанами различного веса. В таких тарелках при малых нагрузках открываются легкие клапаны, а затем, по мере нарастания нагрузок, – более тяжелые.

Перелив флегмы с тарелки на тарелку происходит через сливные устройства, конструкция которых принципиально не отличается от обычно принятых [1].

Клапанные тарелки, по сравнению с колпачковыми, имеют меньшую массу и меньшую склонность к загрязнениям, повышенную пропускную способность, более высокую эффективность массопередачи в широком диапазоне нагрузок по газу (пару) и жидкости.

Основные типы конструкций клапанных тарелок представлены на рис. 2.19.

На рис. 2.19, *a* представлена конструкция тарелки с дисковыми клапанами. В отверстиях полотна 1 тарелки установлены дисковые клапаны 2, которые центрируются тремя расположенными под углом 120° направляющими 4, имеющими нижние ограничители подъема 5. Начальный зазор между кромкой диска клапана и полотном тарелки получают при помощи ограничителей 6. Для уменьшения гидравлического сопротивления в центре клапана выполнено коническое углубление 3, направленное навстречу потоку пара, что обеспечивает плавное обтекание паровым потоком диска клапана.

На клапанной прямоточной тарелке в шахматном порядке расположены отверстия, в которых установлены саморегулирующиеся дисковые клапаны диаметром 50 мм, способные подниматься при движении пара (газа) на высоту до 6...8 мм.

При сборке клапанных тарелок в зависимости от диаметра аппарата на полотне одной тарелки устанавливают от нескольких десятков до

нескольких тысяч клапанов. В связи с этим для аппаратов больших диаметров необходимо упрощение сборки клапанных тарелок.

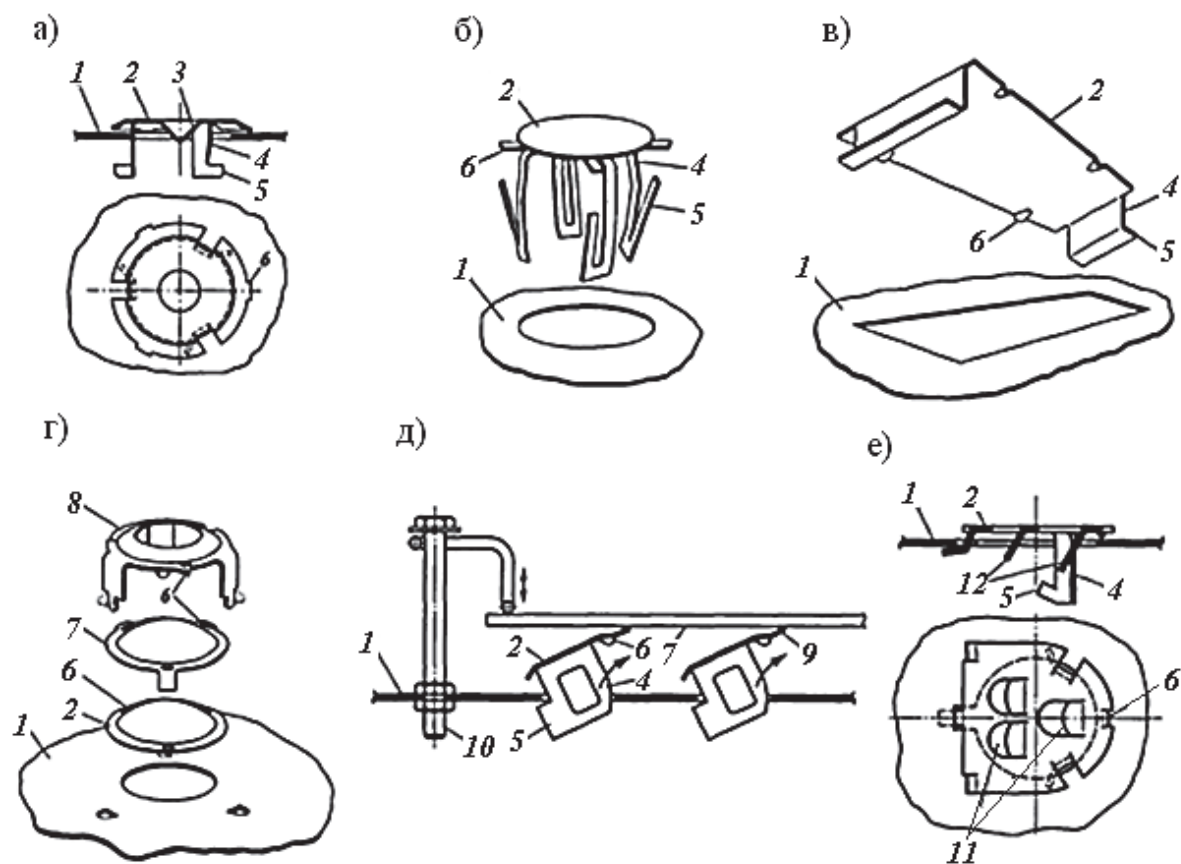


Рис. 2.19. Конструкции клапанных тарелок: а – дисковый клапан фирмы «Nutter»; б – дисковый клапан фирмы «Sulzer»; в – трапециевидный клапан, разработанный ВНИИнефтемаш; г – балластный клапан V-4 фирмы «Glitsch»; д – балластный клапан, разработанный ВНИИнефтемаш; е – прямоочный клапан РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; 1 – полотно тарелки; 2 – клапан; 3 – коническое углубление; 4 – направляющие; 5 – ограничители вертикального подъема; 6 – ограничители начального зазора; 7 – балласт; 8 – специальный ограничитель подъема; 9 – рычаг; 10 – болт; 11 – отверстия в клапане; 12 – козырьки

В отечественной промышленности наиболее распространены клапанные прямоочные тарелки с дисковыми клапанами. На рис. 2.20 представлен принцип действия прямоочной клапанной тарелки.

Дисковый клапан снабжен тремя направляющими, расположенными в плане под углом 45° ; две из этих направляющих имеют большую длину. На диске клапана штамповкой выполнены специальные упоры, обеспечивающие начальный зазор между диском и тарелкой, что исключает воз-

возможность прилипания клапана к тарелке (рис. 2.20, положение I). При небольшой производительности по пару поднимается легкая часть клапана (рис. 2.20, положение II) и пар выходит через щель между клапаном и полотном тарелки в направлении, противоположном направлению движения жидкости по тарелке. С увеличением скорости пара клапан поднимается и заводится над тарелкой (рис. 2.20, положение III), а пар барботирует в жидкость через кольцевую щель под клапаном. При дальнейшем росте производительности по пару клапан занимает положение, при котором пар выходит в направлении движения жидкости, уменьшая разность уровней жидкости на тарелке (рис. 2.20, положение IV), при этом короткая направляющая фиксируется в специальном вырезе на кромке отверстия, обеспечивая заданное положение клапана.

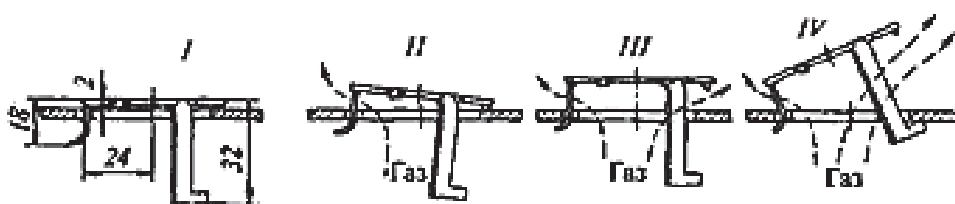


Рис. 2.20. Конструкция прямоточной клапанной тарелки

Эффективность прямоточных клапанных тарелок составляет $0,70...0,80$, $F \leq 2,5$ $(\text{м/с}) \cdot (\text{кг/м}^3)^{-0,5}$, диапазон устойчивой работы 3,5. В области саморегулируемой работы тарелки обладают повышенным гидравлическим сопротивлением.

Один из вариантов конструкции клапана, которая значительно облегчает сборку тарелки, представлена на рис. 2.19, б. Направляющие 4 выполнены с упругими язычками 5, ограничивающими вертикальный подъем клапана. Клапаны устанавливаются сверху без специальных приспособлений путем нажатия на пластину клапана. При этом пружинящие концы направляющих 4 сжимаются навстречу друг другу, а язычки-ограничители 5 заводятся под полотно тарелки. Такая конструкция обеспечивает также снижение расхода металла, т.к. для изготовления клапана используют диски, образовавшиеся при вырубке отверстий в полотне тарелки.

В ВНИИнефтемаш разработана тарелка с трапециевидными клапанами (рис. 2.19, в), у которых меньшее основание трапеции обращено в сторону слива жидкости. Интенсивность прямотока на таких тарелках зависит от отношения высоты трапеции к длине ее боковой стороны: чем меньше это отношение, тем интенсивнее прямоток на тарелке. Простота конструкции тарелок с трапециевидными клапанами и практически безотходная технология изготовления клапанов позволяет изготавливать их в ремонтно-механических цехах НПЗ.

С целью повышения производительности тарелки, увеличения поверхности контакта фаз и расширения диапазона устойчивой работы разработаны балластные клапанные тарелки (рис. 2.19, *з*). При малых нагрузках по пару тарелка работает как обычная с дисковыми клапанами меньшей массы. При увеличении нагрузки дисковый клапан упирается в балласт и работает совместно с ним как один утяжеленный клапан. Такая конструкция позволяет расширить диапазон саморегулирования и уменьшить сопротивление тарелки, особенно при низких нагрузках по пару.

Представляет интерес конструкция прямоточной клапанной тарелки с групповым балластом, разработанная в ВНИИнефтемаш (рис. 2.19, *д*). Полотно 1 тарелки изготовлено с прямоугольными отверстиями, закрытыми сверху клапанами 2 прямоугольной формы 25×150 или 25×300 мм. Клапаны такой формы изготавливаются практически без отходов, а достаточно большие размеры клапана позволяют уменьшить их количество на полотне и снизить тем самым трудоемкость изготовления и стоимость тарелки. Клапаны центрируются в отверстиях полотна тарелки двумя направляющими 4 с ограничителями 5 вертикального перемещения. Каждый клапан имеет рычаг 9, один конец которого жестко прикреплен к клапану, а другой находится над полотном тарелки между клапанами. При низких паровых нагрузках клапаны поднимаются вертикально до тех пор, пока ограничители на направляющих 4 не упрутся в полотно тарелки. При этом тарелка работает в режиме перекрестного тока. Увеличение паровой нагрузки приводит к повороту клапанов, который обеспечивает выход пара в сторону слива жидкости, т.е. на тарелке создается перекрестно-прямоточный режим. Наличие рычагов 9 на клапанах сдвигает переход от перекрестного к перекрестно-прямоточному режиму в сторону повышенных скоростей парового потока.

На рис. 2.19, *е* представлена конструкция прямоточной клапанной тарелки с перфорированными клапанами, в которой выгодно сочетаются повышенная производительность прямоточных клапанных тарелок и высокая эффективность ситчатых тарелок. В отверстиях горизонтального полотна 1 установлены пластинчатые клапаны 2, имеющие отверстия 11 с козырьками 12, высота которых увеличивается в сторону открытия клапанов. Максимальный угол открытия клапанов составляет 25°, при этом площадь зазора между клапаном и полотном тарелки примерно равна площади отверстия в полотне тарелки.

При небольших нагрузках пар проходит через отверстия в клапанах и тарелка работает всем сечением как обычная ситчатая. В области повышенных газовых нагрузок одна часть парового потока выходит из-под клапанов в прямотоке с жидкостью, а другая направляется козырьками в отверстия клапанов. Этим достигаются интенсивное взаимодействие контак-

тирующих фаз, увеличение запаса жидкости на тарелке и высокая эффективность массопередачи [3].

Клапанная тарелка со штампованными клапанами цилиндрической формы показана на рис. 2.21.

Клапан 1, лежащий на полотне тарелки 2, представляет собой часть цилиндра с ограничителями подъема 3. Клапан расположен в гнезде, имеющем отогнутую полку 4. Масса клапана, его конфигурация и положение центра тяжести подобраны так, что при достижении определенной скорости пара клапан перекачивается по поверхности отогнутой полки. При этом между плоскостью тарелки и клапаном образуется щель, через которую в направлении слива жидкости выходит пар. При значительной производительности по пару клапан поднимается и зависает над тарелкой.

В жалюзийно-клапанной тарелке (рис. 2.22) щель для входа газа на тарелку 1 образуется при повороте плоских клапанов-жалюзи 3 вокруг их оси, укрепленной в рамке 2 [4].

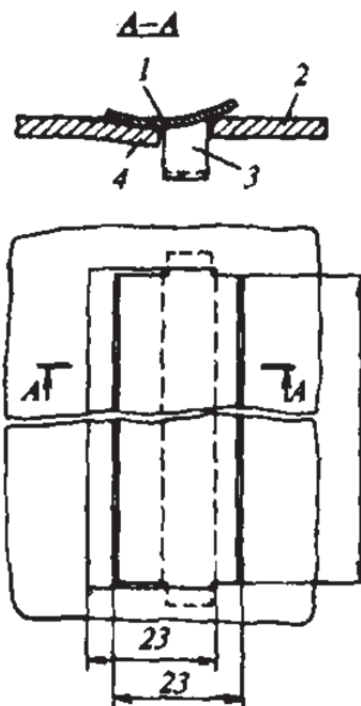


Рис. 2.21. Тарелка со штампованным клапаном:
1 – клапан; 2 – тарелка;
3 – ограничитель; 4 – полка

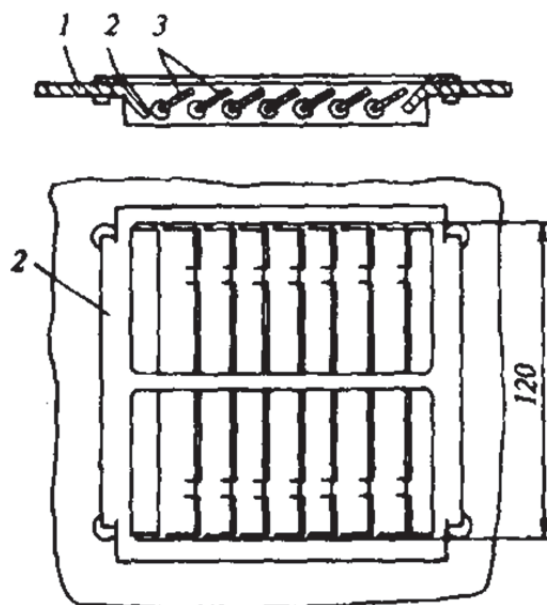


Рис. 2.22. Конструкция жалюзийно-клапанной тарелки:
1 – тарелка; 2 – рама; 3 – клапаны-жалюзи

2.4. Секционированные массообменные устройства

Одна из задач в нефтеперерабатывающей промышленности – разработка и применение аппаратов большой единичной мощности. До недавнего времени повышение эффективности и производительности колонн обеспечивали увеличением их высоты и диаметра. Однако с увеличением диаметра колонны возрастает неупорядоченность движения взаимодействующих фаз: на тарелке появляются «байпасные» потоки, «мертвые» зоны, возникает поперечная неравномерность скорости газового потока и высоты жидкости на тарелке, что снижает эффективность массообмена в колонне. В связи с этим производительность аппарата следует повышать не увеличением размеров аппарата, а созданием контактных устройств, обладающих высокой производительностью по жидкости и пару, в частности продольным и поперечным секционированием этих устройств.

Известно, что производительность тарелок повышается при контактировании фаз в прямоходе. Но при прямоходном взаимодействии и большой скорости пара (газа) жидкость смещается в направлении к сливному карману, что затрудняет работу сливных устройств.

Чтобы компенсировать прямоходное движение фаз и исключить его распространение на всю тарелку, можно устанавливать на тарелке продольные и поперечные перегородки, обеспечивающие зигзагообразное движение жидкости на тарелке от перелива к сливу и создающие условия для движения потоков парожидкостной смеси по тарелке в противоположных или пересекающихся направлениях [4].

Струйные тарелки. У струйных тарелок контактные элементы (просечки, лепестки) расположены таким образом, что пар, выходящий в жидкость под некоторым углом к горизонту, приобретает горизонтальную составляющую скорости, совпадающую с направлением движения жидкости по тарелке или под некоторым углом к нему (рис. 2.23).

Благодаря этому можно создать наиболее благоприятные условия для эффективного контакта фаз при высокой производительности контактного устройства. При чисто прямоходном движении фаз и большой скорости пара происходит снос жидкости в направлении сливного кармана, что затрудняет работу переливного устройства и приводит к снижению эффективности работы тарелки.

Чтобы избежать этого, прибегают к различным приемам, позволяющим локализовать (скомпенсировать) прямоходное движение фаз и не допустить его распространения на всю тарелку. Примером может служить установка поперечных секционирующих перегородок (см. рис. 2.23, б, д), создание движения фаз в пересекающихся направлениях, когда оси соседних лепестков расположены во взаимно перпендикулярном направлении или образуют пучок прямых (см. рис. 2.23, в, з) [3].

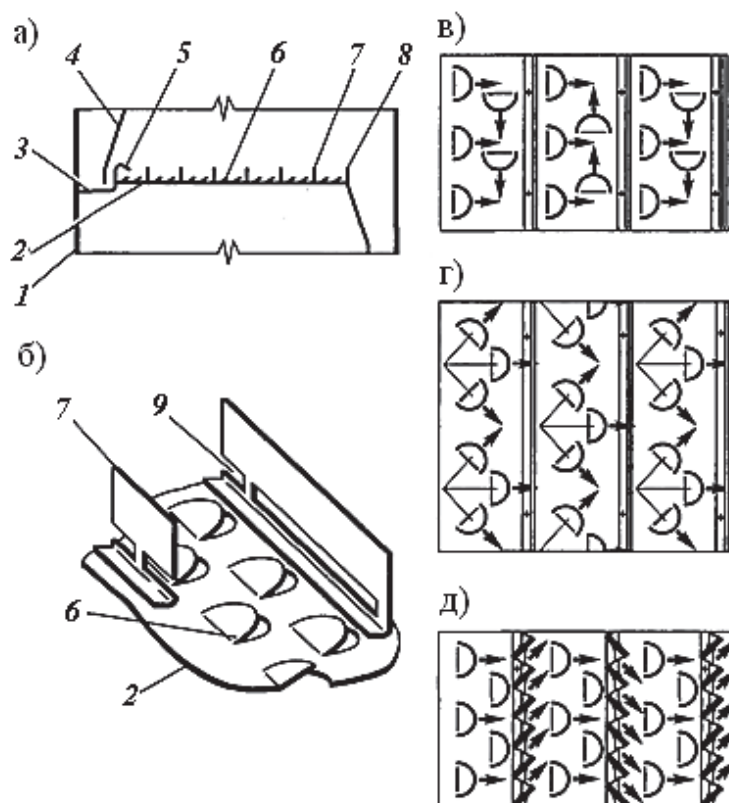


Рис. 2.23. Схема струйно-направленной тарелки: а – общий вид; б – схема контактной зоны; в – ввод части потока пара поперек потока жидкости; г – ввод части потока пара под углом к потоку жидкости; д – установка поперечных перегородок в форме гребенки; 1 – корпус колонны; 2 – полотно тарелки; 3 – приемный карман; 4 – стенка переливного кармана; 5 – подпорная перегородка; 6 – лепесток (язычок); 7 – вертикальная перегородка; 8 – сливная перегородка; 9 – прорезь в вертикальной перегородке

Клапанная тарелка с продольными перегородками 3 является вариантом массообменного устройства с продольным секционированием. В отличие от тарелки с просечными элементами здесь на полотне 1 тарелки вместо просечек смонтированы клапаны 2 с боковыми стенками, обеспечивающие направленное движение жидкостного потока (рис. 2.24).

По производительности такие тарелки превосходят обычные клапанные тарелки без продольного секционирования в 1,4 раза, а по эффективности массообмена – в 1,25...1,3 раза.

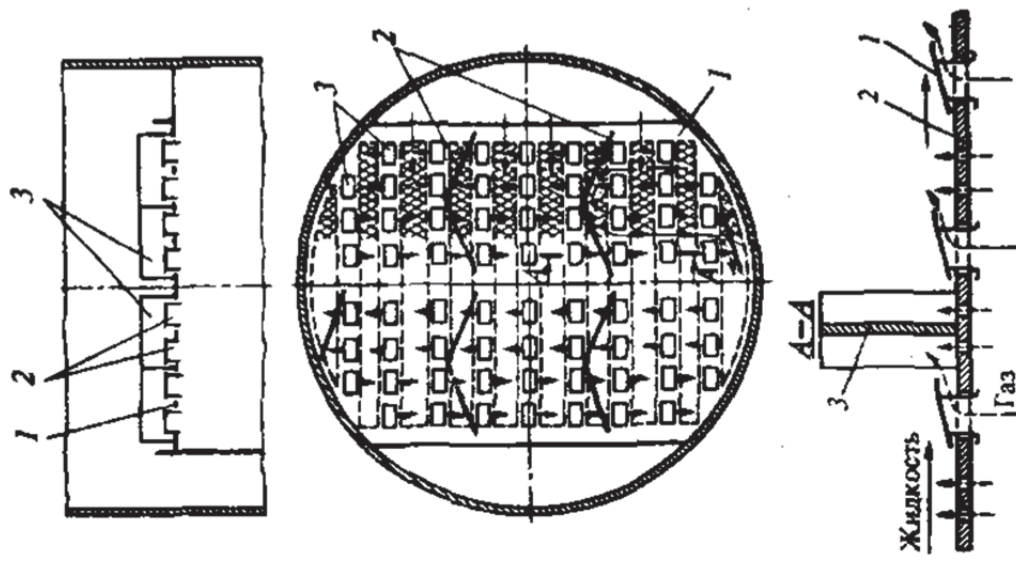


Рис. 2.24. Конструкция комбинированной клапанной тарелки: 1 – тарелка; 2 – клапаны; 3 – перегородки

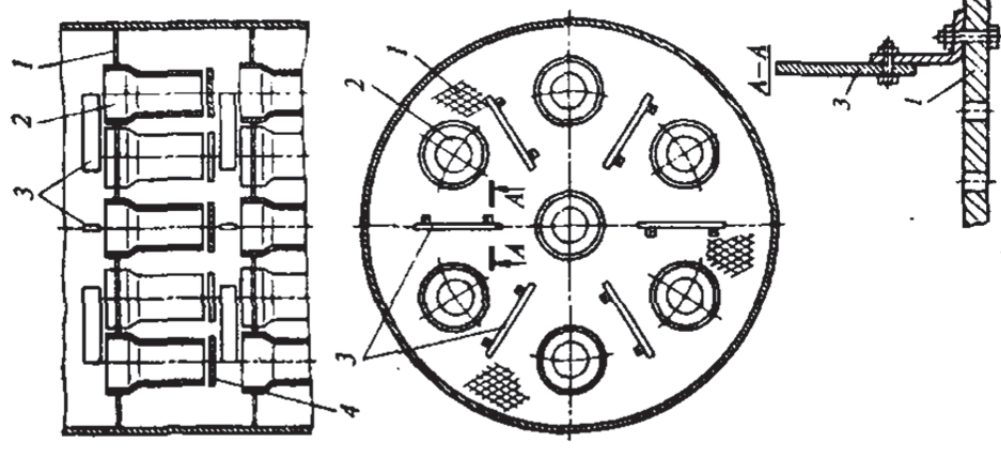


Рис. 2.25. Конструкция тарелки с двумя зонами контакта: 1 – перфорированное основание; 2 – сливной карман; 3 – направляющая планка; 4 – отбойные диски

Многосливную продольно-секционированную тарелку, или тарелку с двумя зонами контакта фаз, целесообразно применять при высокой плотности орошения, например более $50 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, когда работа тарелок лимитируется производительностью переливных устройств. Такая тарелка (рис. 2.25) представляет собой комбинацию барботажной тарелки (ситчатой, клапанной) с устройством, в котором реализуется зона контакта фаз, формирующаяся в пространстве между тарелками при перетекании жидкости.

Тарелка состоит из перфорированного основания 1 с установленными на нем сливными карманами 2 (одно-, двух- и трехщелевыми), направляющих планок 3 и отбойных дисков 4.

Тарелки с двумя зонами контакта фаз позволяют повысить эффективность массообмена примерно на 30 % благодаря образованию дополнительной зоны контакта в пространстве между тарелками.

2.5. Рекомендации по выбору тарельчатых колонных аппаратов

На основе анализа работы тарельчатых контактных устройств для некоторых тарелок описанных конструкций установлены области применения в зависимости от технологического назначения и параметров работы. На рис. 2.26 представлены области устойчивой работы.

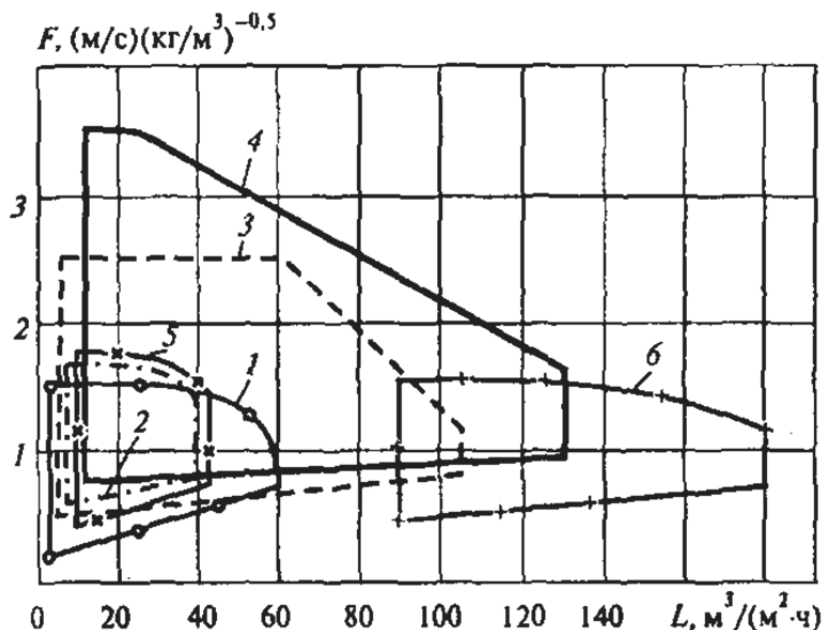


Рис. 2.26. График для определения устойчивой работы тарелок:

- 1 – ситчато-клапанная; 2 – ситчатая; 3 – клапанная;
4 – жалюзийно-клапанная; 5 – колпачковая; 6 – ситчатая многосливная

Ситчатые тарелки эффективны в процессах, протекающих при стабильных режимах работы (диапазон устойчивой работы тарелки до 2) и

производительности по жидкости L до $40 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Эти тарелки нельзя использовать для обработки жидкостей, вызывающих забивание осадком отверстий тарелок.

Ситчатые многосливные тарелки применяют для процессов, требующих эффективного контакта при большой удельной нагрузке по жидкости L до $180 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, ситчато-клапанные – для процессов, проводимых под вакуумом и атмосферным давлением, при L до $60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и F до $1,5 \text{ (м/с)(кг/м}^3)^{-0,5}$. Эти тарелки в меньшей степени подвержены забиванию твердыми включениями, которые сдуваются с поверхности тарелки под действием прямоочной составляющей скорости пара, выходящего из-под клапанов.

Клапанные прямоочные тарелки используют в процессах, протекающих при атмосферном и повышенном давлении, при $L < 100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F < 2,5 \text{ (м/с)(кг/м}^3)^{-0,5}$. Диапазон устойчивой работы этих тарелок 3,5.

Жалюзийно-клапанные тарелки, обладающие высокой эффективностью, имеют несколько более высокое гидравлическое сопротивление по сравнению с ситчато-клапанными и применяются в основном для проведения процессов под давлением, при $L < 130 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и $F < 3,75 \text{ (м/с)(кг/м}^3)^{-0,5}$. Диапазон устойчивой работы достигает 4,5.

Колпачковые тарелки используют в производствах относительно небольшой мощности, а также при небольших нагрузках по жидкости; при этом тарелки обеспечивают поддержание определенного запаса жидкости в контактной зоне [4].

В табл. 2.2 приведены условия применения различных типов тарелок.

Таблица 2.2

Эксплуатационные параметры

Тип тарелки	Диаметр, мм	Условия проведения процесса
Ситчато-клапанная	400...4000	Вакуум, атмосферное давление
Ситчатая	400...4000	Любое давление, стабильный режим
Клапанная	400...4000	Атмосферное и повышенное давление
Колпачковая	400...4000	Любое давление, нестабильный режим
Жалюзийно-клапанная	1000...4000	Атмосферное и повышенное давление
Ситчатая многосливная	1600...4000	Высокоэффективные процессы, большие удельные нагрузки по жидкости

3. РАСЧЕТ ТАРЕЛОК С ПЕРЕЛИВНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

3.1. Расчет диаметра колонны

Расчет тарелок проводится в следующей последовательности:

- рассчитывают максимально допустимую скорость паров в рабочем сечении колонны (полное сечение минус площадь сливных устройств);
- определяют рабочее сечение;
- определяют допустимую скорость жидкости в сливном устройстве;

• рассчитывают конструктивные особенности сливного устройства.

Определение диаметра колонны, м, осуществляется по уравнению

$$D = \sqrt{\frac{4G'_{\Pi}}{u_{\max} \pi}},$$

где G'_{Π} – нагрузка по жидкости и пару, м³/ч; u_{\max} ($u_{\text{доп}}$) – максимально допустимая скорость пара, м/с.

Максимально допустимая скорость пара должна быть несколько ниже предельной скорости, лимитирующей повышение производительности колонны. Для расчета максимальной допустимой скорости пара используют зависимость

$$u_{\max} = C_{\max} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}}},$$

где C_{\max} – коэффициент, учитывающий влияние типа и конструкции тарелки, расстояния между тарелками, расхода жидкости и физических свойств системы; $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{п}}$ – абсолютная плотность жидкости и пара соответственно, кг/м³.

Максимально допустимую массовую скорость паров в свободном сечении можно определить по уравнению Саудерса-Брауна:

$$G_{\max} = 0,305 K_T \sqrt{\rho_{\text{п}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})},$$

где G_{\max} – допустимая массовая скорость, кг/(м²·ч); K_T – коэффициент, зависящий от типа тарелки, расстояния между тарелками, нагрузки по жидкости, длины пути жидкости по тарелке и поверхностного натяжения жидкости.

При заданной температуре абсолютную плотность жидкости $\rho_{\text{ж}}$ вычисляют по формуле

$$\rho_{\text{ж}} = \rho - a(t - 20),$$

где ρ – абсолютная плотность нефтепродукта при 20 °С, кг/м³; a – средняя температурная поправка плотности нефтепродукта на 1 °С.

Среднюю температурную поправку плотности нефтепродукта берут из табл. 3.1.

Таблица 3.1

Температурная поправка для различных значений плотности жидкости

ρ , кг/м ³	a	ρ , кг/м ³	a	ρ , кг/м ³	a
700...710	0,897	850...860	0,699	950...960	0,567
750...760	0,831	900...910	0,633	980...990	0,528
800...810	0,765	920...930	0,607	990...1000	0,515

Плотность паровой фазы ρ_{Π} рассчитывают по формуле

$$\rho_{\Pi} = \frac{G}{3600G'_{\Pi}},$$

где G – суммарный массовый расход всех паров, проходящих через расчетное сечение, кг/ч; G'_{Π} – объемный расход паров, м³/ч.

Величины G и G'_{Π} рассчитывают по формулам

$$G = G_{\text{H}} + G_{\text{Z}},$$

$$G'_{\Pi} = \left[\frac{G_{\text{H}}}{M_{\text{H}}} + \frac{G_{\text{Z}}}{18} \right] \frac{22,4(273 + t)0,1}{3600 \cdot 273P},$$

где G_{H} и G_{Z} – расход нефтяных и водяных паров (если колонна работает при подаче водяного пара), кг/ч; M_{H} – молекулярная масса нефтепродукта; 18 – молекулярная масса воды; t – температура в колонне, °С; P – давление в колонне, МПа.

Значение коэффициента $C_{\text{макс}}$ рассчитывается по уравнению

$$C_{\text{макс}} = 8,47 \cdot 10^{-5} [k_1 k_2 c_1 - c_2 (\lambda - 35)].$$

Значения коэффициента k_1 представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения коэффициента k_1 для расчета максимально допустимой скорости паров

Тип тарелки	k_1
Колпачковая	1,00
Из S-образных элементов	1,00
Клапанная (свободное сечение тарелки $F_{\text{св}} (S_{\text{св}}) = 0,1 \text{ м}^2/\text{м}^2$)	1,15
Ситчатая и струйная ($F_{\text{св}} = 0,08 \text{ м}^2/\text{м}^2$)	1,20
Ситчатая с отбойными элементами	1,40

Для ректификационных колонн, работающих при атмосферном и повышенном давлении при расстоянии между тарелками $H_T \geq 350$ мм $k_2 = 1$; c_2 для струйных тарелок равно 5 и для всех остальных 4; коэффициент c_1 определяется по рис. 3.1.

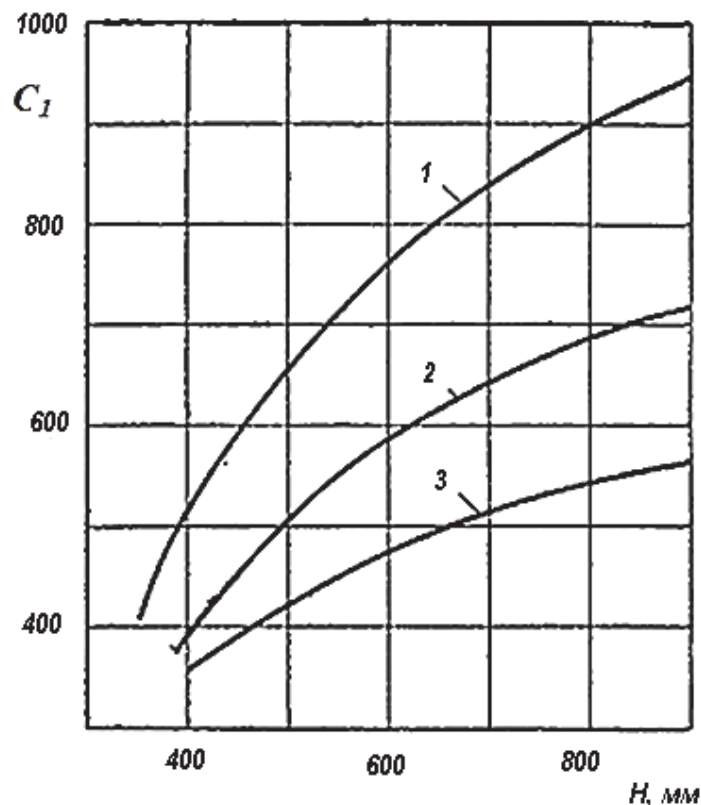


Рис. 3.1. График для определения коэффициента c_1 :
 1 – колонны, работающие при атмосферном и повышенном давлении;
 2 – вакуумные колонны; 3 – абсорберы и десорберы

Коэффициент λ рассчитывается по уравнению

$$\lambda = \frac{0,655 G'_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \sqrt{\frac{k_1 c_1}{G'_{\text{п}}}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}}},$$

где $G'_{\text{ж}}$ – нагрузка по жидкости, м³/ч.

При нагрузке по жидкости $L_V < 10$ м³/(м·ч) величина $\lambda = 10$, а при $L_V > 65$ м³/(м·ч) следует принимать $\lambda = 65$.

Для ректификационных колонн, разделяющих легкие углеводородные газы под высоким давлением, используют следующую зависимость:

$$C_{\text{макс}} = 9 \cdot 10^{-5} H_T c',$$

где H_T (H) – межтарельчатое расстояние, мм.

Коэффициент c' определяют при помощи графика, представленного на рис. 3.2.

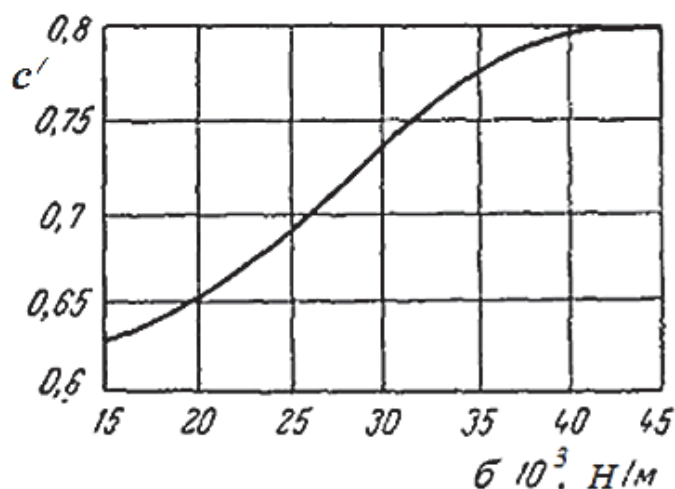


Рис. 3.2. График для определения коэффициента c'

Для вакуумных колонн при остаточном давлении вверху колонны 40...100 мм рт. ст. коэффициент c_1 определяют по рис. 2.1, $c_2 = 0$, $k_2 = 1$ для колонн с промывным сепаратором в питательной секции колонны, $k_2 = 0,9$ для колонн без сепараторов, $k_2 = 0,6$ при перегонке пенящихся или высоковязких жидкостей.

Для абсорберов $k_2 = 1$, для десорберов $k_2 = 1,13$, коэффициент c_1 определяют по рис. 3.1.

Для клапанных балластных тарелок коэффициент $C_{\text{макс}}$ определяется по уравнению, рекомендованному фирмой «Глитч» (США):

$$C_{\text{макс}} = f_1 f_2 c,$$

где f_1 – коэффициент, характеризующий уменьшение максимально допустимой нагрузки по отношению к предельной, равный 0,65...0,75; f_2 – коэффициент, характеризующий вспениваемость жидкости (табл. 3.3); c – коэффициент, зависящий от плотности пара и расстояния между тарелками.

Таблица 3.3

Коэффициент вспениваемости жидкостей

Характеристика системы	Значение f_2
Жидкость непенящаяся (ректификация нефтяных фракций, УВ газов)	1,0
Со слабым вспениванием	0,9
Со средним вспениванием (абсорбция УВ газов керосином, растворами аминов)	0,85
С сильным вспениванием (осушка газов растворами гликолей)	0,73

Коэффициент c определяется по графику, представленному на рис. 3.3.

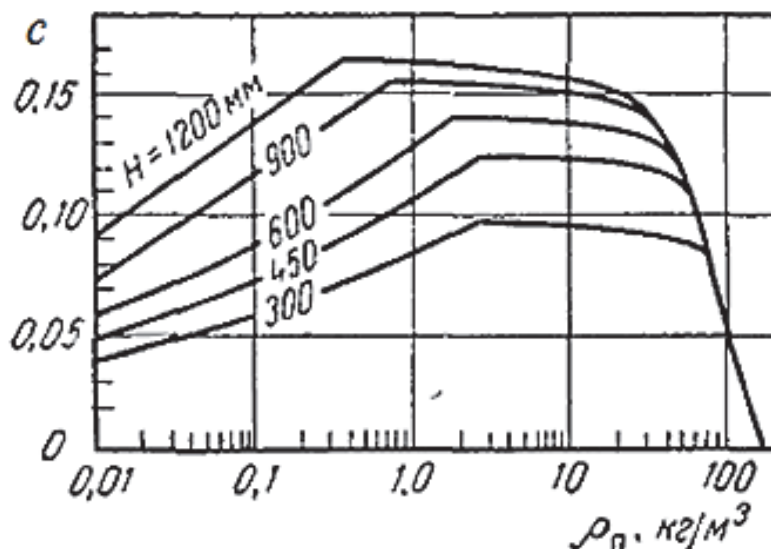


Рис. 3.3. График для определения коэффициента c

Методика расчета коэффициента $C_{\text{макс}}$ фирмы ЭССО (США) предлагает следующее уравнение:

$$C_{\text{макс}} = 0,019\psi c_1 c_2 H_T^{0,5}.$$

Значения коэффициента c_1 при различных давлениях в системе представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Значения коэффициента c_1 для расчета максимально допустимой скорости пара

Значение давления в системе, атм	Значение коэффициента
$\leq 3,5$	1,9
3,5...17,5	1,7
$> 17,5$	1,5

Значения коэффициента c_2 можно определить, используя рис. 3.4. Коэффициент ψ рассчитывается по уравнению

$$\psi = \frac{f_k - f_{\Pi}}{f_k},$$

где f_k – площадь поперечного сечения колонны, м^2 ; f_{Π} – площадь одного переливного устройства, м^2 .

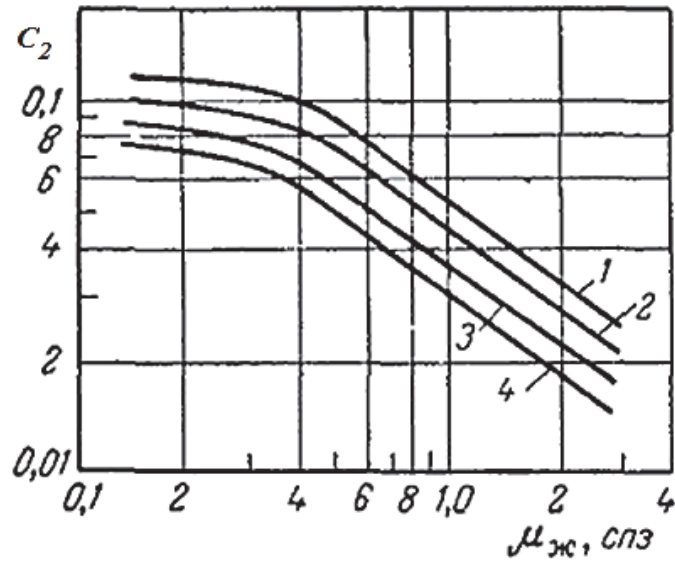


Рис. 3.4. График для определения коэффициента c_2 : 1 – при $P \leq 1$ атм; 2 – при $P = 7$ атм; 3 – при $P = 14$ атм; 4 – при $P = 21$ атм

Для условий работы атмосферных и вакуумных колонн, разделяющих непенящиеся жидкости ($\sigma \geq 20$ мН/м), с колпачковыми и ситчатыми тарелками с малыми жидкостными нагрузками, лимитируемым межтарельчатым уносом жидкости, предельные скорости пара рекомендуется рассчитывать с использованием графиков, представленных на рис. 3.5 и 3.6.

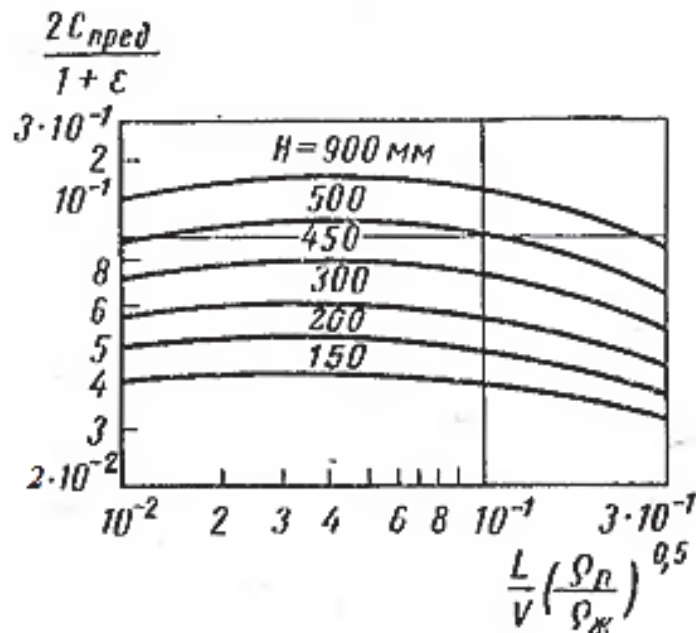


Рис. 3.5. График для определения предельных нагрузок по пару в тарельчатых колоннах, работающих при атмосферном давлении или под вакуумом: $\epsilon (S_p)$ – относительная рабочая площадь тарелки

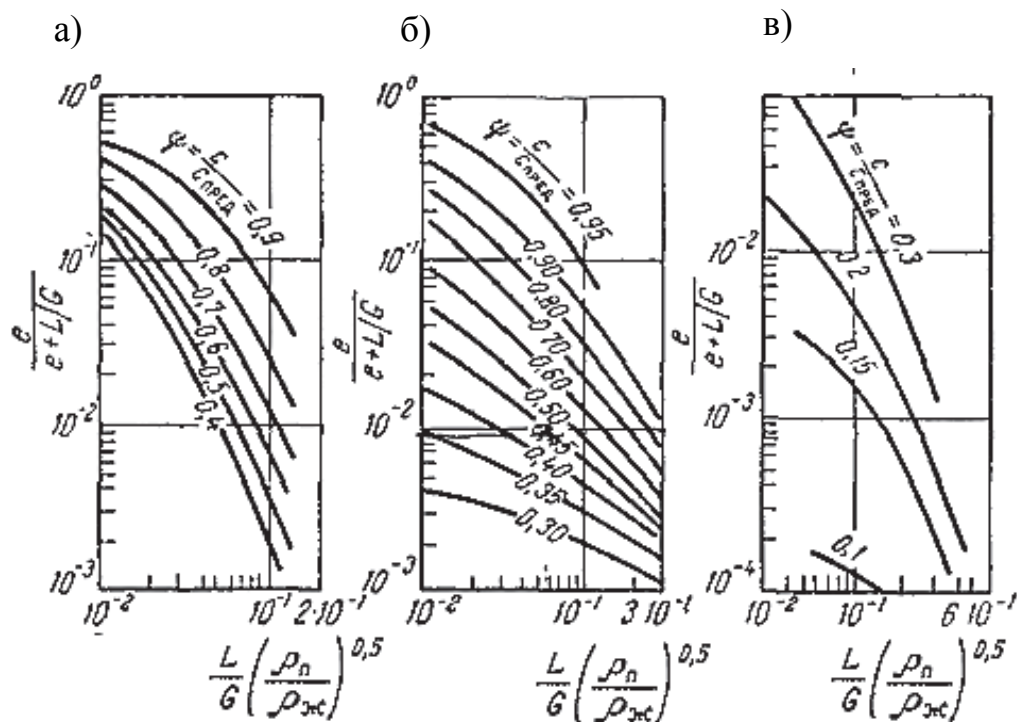


Рис. 3.6. Графики для определения коэффициента ψ для колпачковых (а), ситчатых (б) и струйных (в) тарелок: e – относительный унос жидкости (кмоль/кмоль пара или кг/кг пара)

Тогда с учетом рис. 3.5 и 3.6 коэффициент $C_{\text{макс}}$ рассчитывается по формуле

$$C_{\text{макс}} = 0,5\psi A(1 + \varepsilon),$$

где ε – относительная рабочая площадь тарелки, $\text{м}^2/\text{м}^2$.

Комплекс A выражается формулой

$$A = \frac{2C_{\text{пред}}}{1 + \varepsilon}.$$

Приведенные зависимости рекомендуется применять для ситчатых тарелок, имеющих диаметр отверстия $d_{\text{отв}} \leq 6,5$ мм и свободную площадь тарелки $S_{\text{св}} \geq 0,1\varepsilon \text{ м}^2/\text{м}^2$. Если свободное сечение меньше $(0,06 \dots 0,08)\varepsilon$, то коэффициент $C_{\text{макс}}$ уменьшают на 10...20 %.

Коэффициент K_T можно определить графически. График Нельсона (рис. 3.7) построен на основании обследования промышленных ректификационных колонн с тарелками различного типа.

При выборе кривой для определения коэффициента K_T можно пользоваться данными для колонн, работающих при атмосферном и повышенном давлениях, которые представлены в табл. 3.5

Таблица 3.5

Рекомендации для выбора коэффициента K_T

Удельная жидкостная нагрузка на сливную перегородку, $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$	до 15	15...40	40...70	70...90
Область кривых, рекомендуемая для определения коэффициента K_T	1...2	2...3	3	3

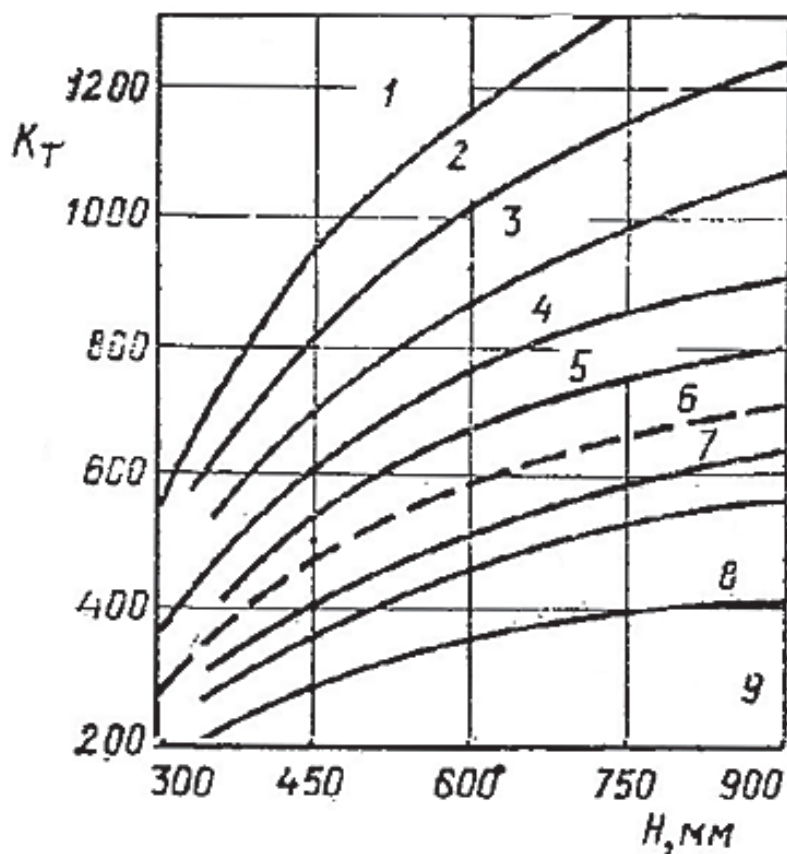


Рис. 3.7. График Нельсона: 1, 2 – для ситчатых, решетчатых, каскадных тарелок при пониженной (1) и нормальной (2) нагрузках по жидкости; 3, 4, 5 – для колпачковых тарелок при нагрузках по жидкости 15...40, 40...70, 70...90 $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$; 6 – для колпачковых тарелок по Саудерсу-Брауну; 7 – для вакуумных колонн с умеренным уносом брызг; 8 – для абсорбционных колонн; 9 – для вакуумных колонн с повышенным уносом брызг

Кривая 6 на рис. 3.7 дает заниженные значения скорости для колонн, работающих при атмосферном и более высоких давлениях, и завышенные значения для абсорбционных и вакуумных колонн. И. А. Александров отмечает, что в атмосферных и вакуумных колоннах предельные нагрузки ограничены чрезмерным уносом жидкости, а в колоннах под давлением – захлебыванием [7].

При определении K_T по графику Нельсона необходимо предварительно задаваться значением жидкостной нагрузки, а затем, определив размеры колонны, проверять правильность принятого решения.

Максимально допустимая линейная скорость $u_{\text{доп}}$, м/с, рассчитывается по уравнению

$$u_{\text{макс}} = \frac{G_{\text{макс}}}{\rho_{\text{п}}} = \frac{0,305}{3600} K_T \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}} - 1}. \quad (3.1)$$

Так как $\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}} \gg 1$, уравнение (3.1) можно записать

$$u_{\text{макс}} = \frac{G_{\text{макс}}}{\rho_{\text{п}}} = \frac{0,305}{3600} K_T \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}}}.$$

Следующим шагом является определение допустимой скорости жидкости в сливном стакане тарелки, обеспечивающей ее переток без захлебывания контактного устройства. Расчетное уравнение имеет вид

$$u_{\text{д}} = 0,008 K_c \sqrt{H_T (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})},$$

где K_c – коэффициент, учитывающий склонность систем к пенообразованию (табл. 3.6); H_T – расстояние между тарелками, мм.

Таблица 3.6

Коэффициент вспениваемости жидкости

Характеристика системы	Значение K_c
Без вспенивания	1,00
С умеренным вспениванием (в масляных абсорберах)	0,85
Со значительным вспениванием (в гликолевых колоннах)	0,73
С интенсивным вспениванием (в колоннах с применением метилэтилкетона)	0,60

Скорость течения жидкости в сливном стакане не должна превышать 21 м/с. При больших скоростях затрудняется выделение пузырьков пара из жидкости даже при значительной (более 5 с) продолжительности пребывания жидкости в стакане, т.к. скорость всплывания пузырьков приближается к скорости течения жидкости.

Площадь рабочего сечения тарелки, по которой поднимаются пары, рассчитывается по уравнению

$$S_1 = \frac{G}{G_{\text{макс}}} = \frac{G_{\text{п}}'}{3600 u_{\text{доп}}}.$$

Площадь тарелки, занятая сливными устройствами, вычисляется по формуле

$$S_2 = \frac{G'_{ж}}{u_d}.$$

Полное сечение колонны рассчитывается по уравнению

$$S = S_1 + 2S_2.$$

Тогда возможен расчет диаметра по следующему уравнению:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = 1,13\sqrt{S}.$$

3.2. Расчет переливного устройства тарелки

На рис. 3.8 представлена схема колпачковой тарелки. Уровень h' светлой жидкости в переливном устройстве определяется уровнем светлой жидкости на нижележащей тарелке ($h_{п} + \Delta h + \Delta$), сопротивлением перетоку жидкости с тарелку на тарелку, равным общему сопротивлению тарелки ΔP (м или мм), и сопротивлением сливного устройства $\Delta h_{ж}$.

Нормальная работа сливного устройства обеспечивается выполнением следующих условий:

1) Расход жидкости на единицу длины сливной перегородки $G'_{с.п}$ не должен превышать $65 \text{ м}^3/\text{м}\cdot\text{ч}$, что соответствует высоте подпора жидкости над сливной перегородкой $\Delta h = 50 \text{ мм}$. Для ситчатых тарелок с отбойными элементами расход жидкости на единицу длины слива (напряженность слива) не должен превышать $30\dots 40 \text{ м}^3/\text{м}\cdot\text{ч}$. Напряженность слива рассчитывают по уравнению

$$G'_{с.п} = \frac{G'_{ж}}{\Pi}.$$

Периметр слива рассчитывают по формуле

$$\Pi = 0,705D.$$

Расход жидкости несколько более $65 \text{ м}^3/\text{м}\cdot\text{ч}$ можно принять, если соблюдаются остальные условия нормальной работы сливного устройства.

2) Сопротивление перетоку жидкости $\Delta h_{ж}$ должно быть меньше 25 мм. Его рассчитывают по формуле

$$\Delta h_{ж} = 200 \left(\frac{G'_{с.п}}{3600\Pi} \right)^2.$$

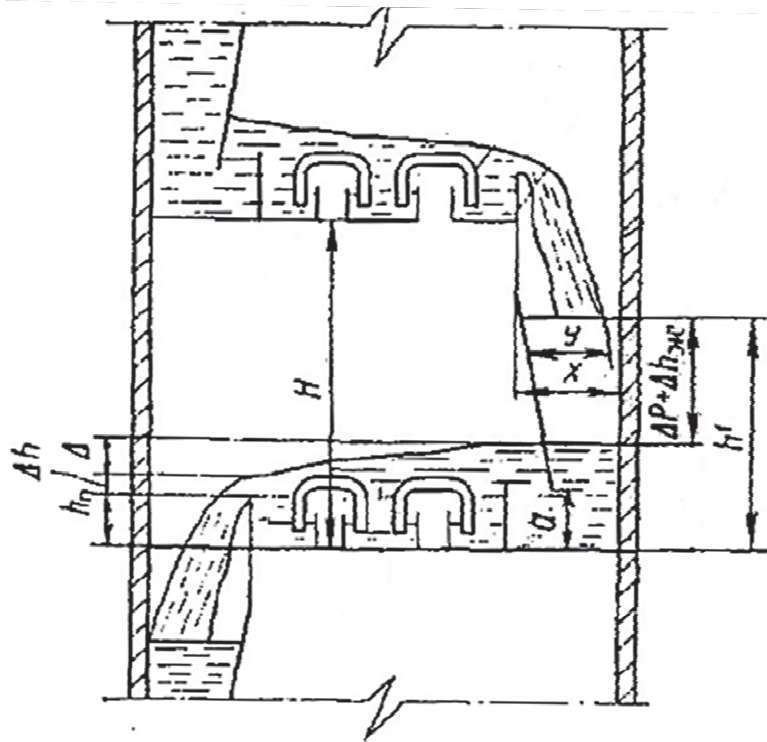


Рис. 3.8. Схема тарелки с круглыми колпачками:

- $\Delta h_{ж}$ – сопротивление перетоку жидкости в сливном кармане;
 $h_{п}$ – высота сливной перегородки; Δ – градиент уровня жидкости;
 Δh – высота подпора жидкости над сливной перегородкой;
 x – ширина сливного стакана; y – длина вылета струи жидкости;
 a – ширина наиболее узкого сечения сливного устройства;
 H – расстояние между тарелками, мм

3) Высота слоя вспененной жидкости в стакане H' не должна подниматься выше сливной перегородки и рассчитывается по неравенству

$$H' < H + h_{п},$$

где H (H_T) – расстояние между тарелками, мм.

Формула для расчета вспененной жидкости в стакане имеет вид

$$H' = K_{п} h'.$$

Коэффициент $K_{п}$ определяется по табл. 3.7.

Таблица 3.7

Значение коэффициента $K_{п}$ для расчета сливного стакана

Характеристика системы	Значение $K_{п}$
Для жидкостей слабопнящихся	1,25...1,50
Для жидкостей среднепнящихся	2,00
Для жидкостей сильнопнящихся	2,50...3,00

4) Между шириной сливного стакана x и длиной вылета струи y должно соблюдаться неравенство $y < 0,6x$. Если струя перекрывает значительно большую часть сливного стакана, то удаление газа из газированной жидкости затрудняется. Величину y рассчитывают по уравнению

$$y = 0,8\sqrt{\Delta h(H_T + h_{\Pi} - H')}.$$

Для тарелок колпачковых, желобчатых, ситчатых, струйных и с S-образными элементами для расчетов Δh используют формулу

$$\Delta h = 0,0028 + K \left(\frac{G_{\text{ж}}'}{\Pi} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где K – коэффициент (рис. 3.9).

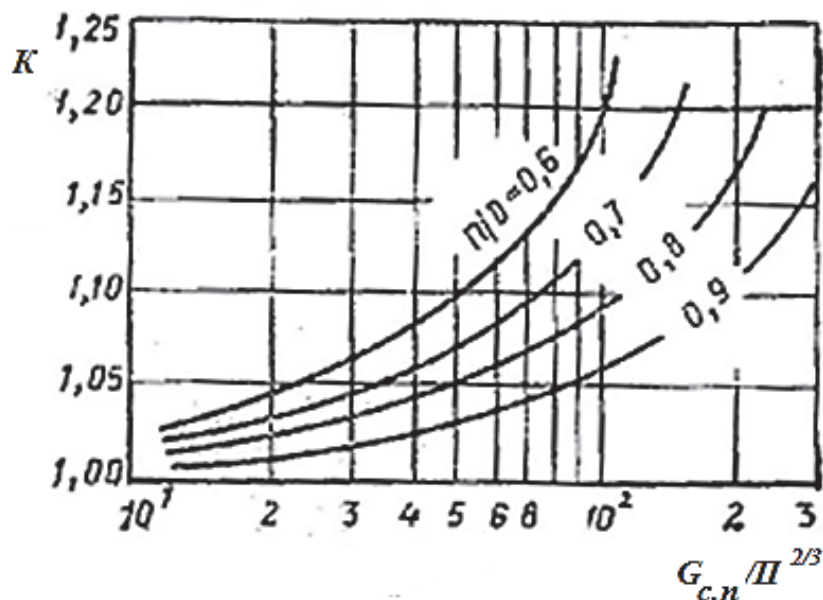


Рис. 3.9. График определения коэффициента K

Для двухсливных тарелок Δh рассчитывается по уравнению

$$\Delta h = 0,0028 + K \left(\frac{G_{\text{ж}}'}{4\Pi} \right)^{\frac{2}{3}}.$$

5) Для полного отделения газа от жидкости время пребывания жидкости в сливном стакане составляет 3...5 с. Уравнение для расчета продолжительности пребывания жидкости в стакане имеет вид

$$\tau = \frac{S_2 H'}{G_{\text{ж}}'}.$$

3.3. Диапазон устойчивой работы тарелок

Свободное сечение тарелок и расстояние между ними являются основными факторами, определяющими диапазон их устойчивой работы. В отличие от расстояния между тарелками, которое влияет только на максимально допустимые нагрузки, величина свободного сечения влияет также на минимально допустимые нагрузки по паре, изменяя тем самым диапазон устойчивой работы. Таким образом, при заданном расстоянии между тарелками H_T свободное сечение и диапазон устойчивой работы связаны между собой.

На практике диапазон устойчивой работы определяют для тарелок, свободное сечение которых практически постоянно (колпачковые, с S-образными элементами, клапанные).

Диапазон устойчивой работы проверяется по графику области устойчивой работы, представленному на рис. 3.10.

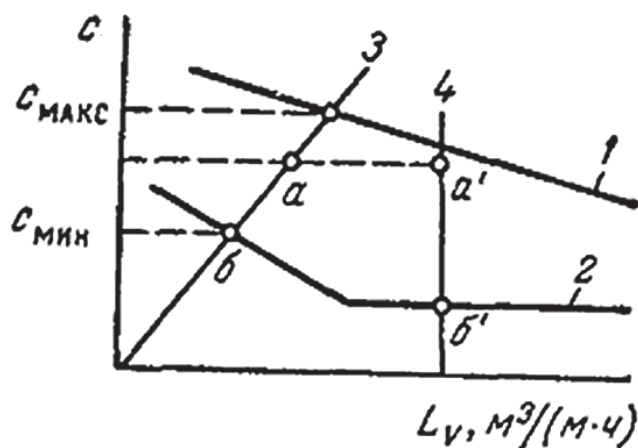


Рис. 3.10. График области устойчивой работы тарелки: 1 — линия максимально допустимых нагрузок; 2 — линия минимально допустимых нагрузок; 3 — рабочая линия колонны, соответствующая изменению ее производительности при постоянном флегмовом числе; 4 — рабочая линия колонны, соответствующая изменению ее производительности при постоянном расходе жидкости

Отношение ординат a и b , а также a' и b' на рис. 3.10 определяет диапазон устойчивой работы тарелки n .

Линию минимально допустимых нагрузок для *колпачковых тарелок* можно построить, используя график на рис. 3.11.

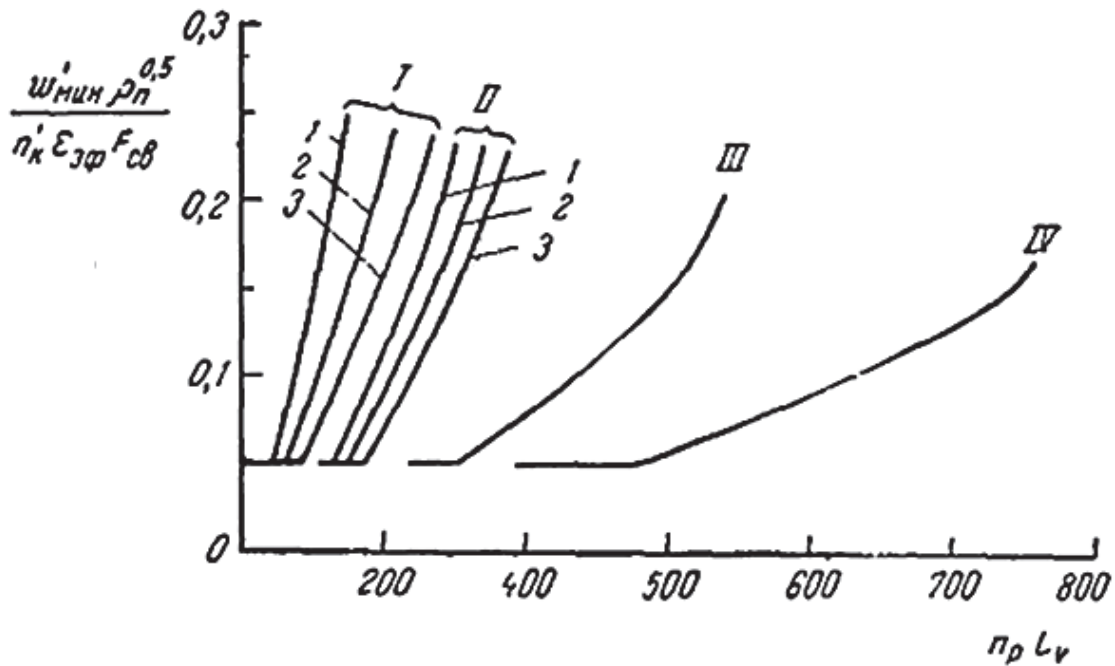


Рис. 3.11. Линии минимально допустимых нагрузок по пару для колпачковых тарелок с круглыми колпачками диаметром 100 мм: n'_k – число колпачков, приходящихся на единицу рабочей площади тарелки; ω'_{\min} – скорость пара в свободном сечении колонны, соответствующая началу равномерной работы тарелки; n_p – число рядов колпачков или паровых патрубков тарелки из S-образных элементов на одном потоке жидкости; h_3 – зазор между колпачком и основанием тарелки, мм; $h_{\text{погр}}$ – глубина погружения прорезей, мм; Δh – высота подпора жидкости над сливом, мм; I – $h_3 = 10$ мм; II – $h_3 = 25$ мм; III – $h_3 = 45$ мм; IV – $h_3 = 60$ мм; 1 – $(h_{\text{погр}} + \Delta h) = 0$; 2 – $(h_{\text{погр}} + \Delta h) = 12$ мм; 3 – $(h_{\text{погр}} + \Delta h) = 25$ мм

Расчетная минимально допустимая скорость пара u_{\min} , при которой наблюдается устойчивая и эффективная работа колпачковой тарелки, определяется по формуле

$$u_{\min} = \omega'_{\min} + 8,47 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Pi}}{\rho_{\Pi}}}$$

Для тарелок с S-образными элементами линию минимальных нагрузок можно построить по уравнению

$$u_{\min} = C_{\min} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Pi}}{\rho_{\Pi}}}$$

Коэффициент $C_{\text{мин}}$ принимает значения:

- при $\frac{L_V}{n_p} \leq 4,7$ $C_{\text{мин}} = 5,75 \cdot 10^{-3} \left(7 - \frac{L_V}{n_p}\right)$;
- при $\frac{L_V}{n_p} > 4,7$ $C_{\text{мин}} = 1,32 \cdot 10^{-2}$.

Для *клапанных тарелок* коэффициент $C_{\text{мин}}$ рассчитывается по уравнению

$$C_{\text{мин}} = \frac{5S_{\text{св}}}{\sqrt{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}}$$

Для *клапанных балластных тарелок* пользуются уравнением

$$C_{\text{мин}} = 0,0915S_{\text{св}}$$

Свободное сечение *клапанных тарелок* рассчитывается по уравнению

$$S_{\text{св}} = 0,91S_p \left(\frac{d_{\text{отв}}}{l_{\text{ш}}}\right)^2,$$

где $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия, м; $l_{\text{ш}}$ – шаг между колпачками или отверстиями, м.

Свободное сечение *струйных тарелок* определяют по формуле

$$S_{\text{св}} = \frac{C_{\text{макс}}}{aL_V + bn}$$

Для струйных тарелок $a = 47,3$ и $b = 5530$, для струйных с отбойниками $a = 20$ и $b = 2430$. Диапазон устойчивой работы n струйных тарелок, как и ситчатых, возможно определить по рис. 3.12.

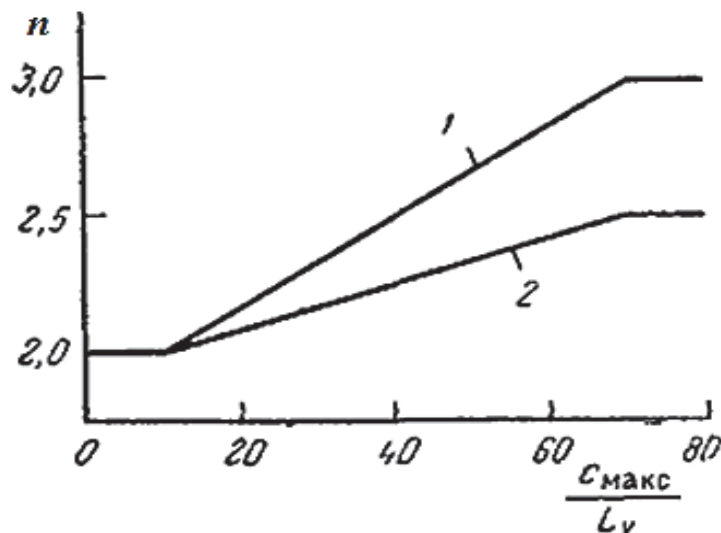


Рис. 3.12. Выбор диапазона устойчивой работы тарелки:

L_V – расход жидкости на единицу длины сливной планки, $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$;
 1 – струйные и струйные с отбойниками тарелки; 2 – ситчатые тарелки

Свободное сечение *ситчатых* тарелок рассчитывается по уравнению

$$S_{\text{св}} = \frac{1,6 \left(\frac{u_{\text{макс}}}{n} \right) \rho_{\text{п}}^{0,5}}{100 \left(1 - \sqrt{1 - 3,2 \cdot 10^{-3} \left(h_{\text{п}} d_{\text{ж}} + 3,2 \left(\frac{L_{\text{V}}}{n} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{4\sigma}{d_{\text{отв}}} + 63 \right)} \right)},$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, дин/см.

Расчетные величины свободного сечения следует подвергнуть проверке.

Для *струйных* тарелок должно выполняться неравенство

$$S_{\text{св}} \leq \frac{f_{\text{пр}} \varepsilon_{\text{эф}}}{2(b_1 + a_1)(b_2 + a_2)},$$

где b_1, b_2, a_1, a_2 – размеры отверстий и расстояние между ними, м; $f_{\text{пр}}$ – площадь одной прорези в струйной тарелке, м².

Возможность использования расчетного свободного сечения струйных тарелок с отбойниками проверяется тем, что свободное сечение прорезно-вытяжного листа может составлять 10...20 %.

Для *ситчатой* тарелки должно выполняться равенство

$$\frac{d_{\text{отв}}}{l_{\text{ш}}} = 0,95 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{эф}}}{S_{\text{св}}}},$$

при этом

$$\frac{d_{\text{отв}}}{l_{\text{ш}}} \in [2,5; 5,0].$$

3.4. Гидравлическое сопротивление тарелок

Гидравлическое сопротивление тарелки, Па, складывается из сопротивлений сухой тарелки $\Delta P_{\text{с}}$ и слоя жидкости на тарелке $\Delta P_{\text{ж}}$ и сопротивления, обусловленного силой поверхностного натяжения ΔP_{σ} и рассчитывается по формуле

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{ж}} + \Delta P_{\sigma}.$$

Обычно сопротивлением, обусловленным силами поверхностного натяжения, пренебрегают.

Потеря скоростного напора газа (пара) вследствие преодоления местных сопротивлений на сухой, неорошаемой тарелке, Па, определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi \cdot \frac{u_{\text{с}}^2}{2} \cdot \rho_{\text{п}},$$

где u_s – скорость в патрубках, м/с.

Коэффициент сопротивления сухой тарелки ξ для различных тарелок представлен в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Значение коэффициента сопротивления сухой тарелки

Тип тарелки	Значение коэффициента ξ
Колпачковая	4,0...5,0
Тарелка с S-образными элементами	4,1
Клапанная тарелка	3,6
Ситчатая тарелка	1,1...2,0
Тарелка струйная с отбойными элементами	1,5
Тарелка струйная	1,2

Приближенное значение коэффициента сопротивления *колпачковых* тарелок можно найти с помощью рис. 3.13.

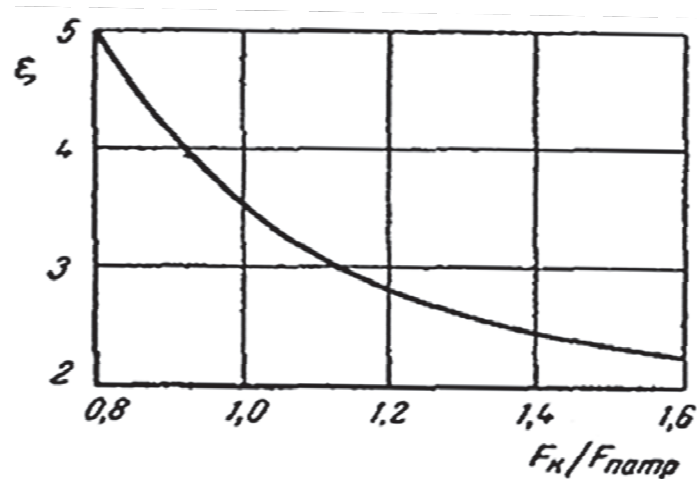


Рис. 3.13. График для определения коэффициента сопротивления сухой колпачковой тарелки: F_k – площадь кольцевого зазора между колпачком и патрубком, m^2 ; $F_{патр}$ – площадь патрубка колпачковой тарелки, m^2

Коэффициент сопротивления клапанных тарелок со стандартными клапанами определяется по соотношению:

- при $\frac{h}{d_{отв}} < 0,23$

$$\xi = 0,541 \left(\frac{h}{d_{отв}} \right)^{-1,175},$$

- при $\frac{h}{d_{отв}} \geq 0,23$ $\xi = 3,12,$

где h – высота подъема клапана, м; $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия под клапаном, м.

Коэффициент сопротивления *ситчатых* тарелок определяется по уравнению

$$\xi = \frac{1}{k^2} \left(\frac{l_{\text{ш}}}{d_{\text{отв}}} \right)^{0,2} (1 - S_{\text{св}}^2),$$

где $l_{\text{ш}}$ – шаг между колпачками или отверстиями, м.

Коэффициент k определяется по рис. 3.14.

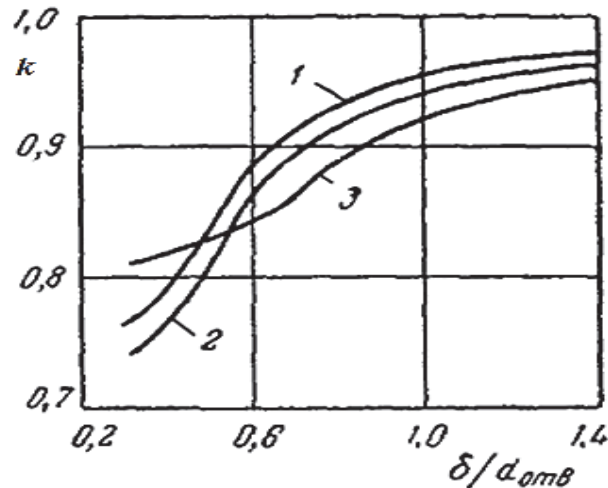


Рис. 3.14. График для определения коэффициента k :

δ – толщина тарелки, м; 1 – $Re = 4000 \dots 20000$;

2 – $Re = 3000$; 3 – $Re = 2000$

Потеря напора газового потока в слое жидкости для *колпачковых* тарелок определяется по формуле (см. рис. 3.14)

$$\Delta P_{\text{ж}} = \left(h_{\text{погр}} + h_{\text{откр}} + \Delta h + \frac{\Delta}{2} \right) d_{\text{ж}}.$$

Схема тарелки с колпачками и с S-образными элементами представлена на рис.3.15.

Высота погружения прорезей $h_{\text{погр}}$ определяется как разность отметок верхней кромки сливной перегородки и верхнего обреза прорезей. Высота открытия $h_{\text{откр}}$ прямоугольных прорезей определяется по уравнению

$$h_{\text{откр}} = 756 \left(\frac{G'_{\text{пр}}}{b} \sqrt{\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где $G'_{\text{пр}}$ – объем газа, проходящего через одну прорезь колпачка, м³/с; b – ширина прорези колпачка или щели решетчатой тарелки, м.

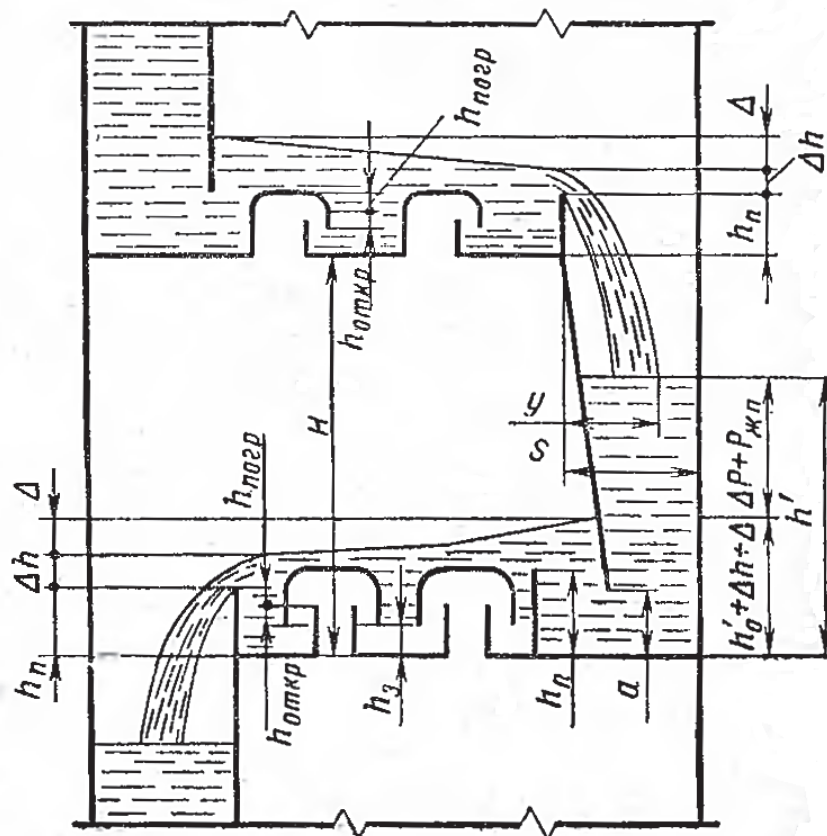


Рис. 3.15. Схема работы колпачковой тарелки и тарелки с S-образными элементами: $h_{\text{погр}}$ – глубина погружения прорезей, мм; $h_{\text{откр}}$ – высота открытия прорезей, мм; h_3 – зазор между колпачком и основанием тарелки, мм; $h_{\text{п}}$ – высота переливной планки, мм; Δh – высота подпора жидкости над водосливом, мм; Δ – градиент уровня жидкости на тарелке (разность статических уровней на входе и выходе), мм; a – линейный размер наиболее узкого сечения перелива, м; h'_0 – высота светлой жидкости на тарелке, м; h' – высота светлой жидкости в сливном устройстве, м; ΔP – общий перепад давления на тарелке, потеря напора, мм вод. ст.; $\Delta P_{\text{ж.п.}}$ – сопротивление движению жидкости в переливе, мм ст. жид.

Для треугольных и трапециевидных прорезей рекомендуется найти нагрузку при полностью открытых прорезях колпачка (т.е. максимально допустимую нагрузку), а затем по рис. 3.16 определить высоту действительного открывания.

Для приближенных расчетов при максимально допустимых нагрузках можно пользоваться зависимостью

$$h_{\text{откр}} = \frac{2}{3} h_{\text{пр}},$$

где $h_{\text{пр}}$ – высота прорези колпачка, мм.

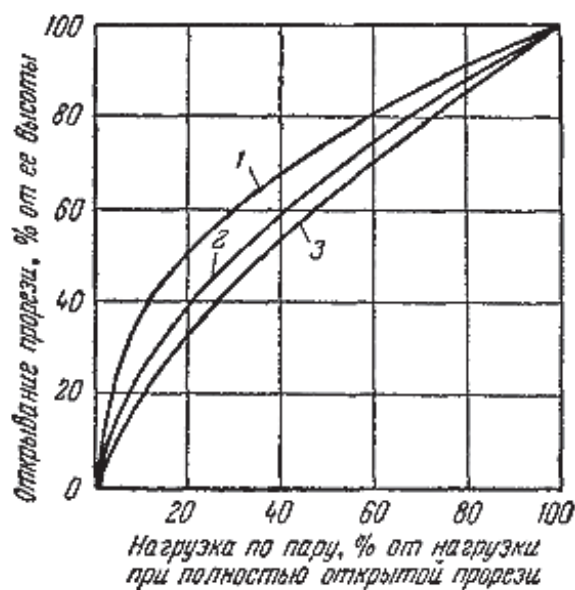


Рис. 3.16. Определение высоты открывания прорези колпачка:
 1 – треугольная прорезь; 2 – трапециевидная прорезь;
 3 – прямоугольная прорезь

Подпор жидкости над сливной планкой Δh , мм, рассчитывается согласно уравнению

$$\Delta h = k_1 k_2 L_V^{\frac{2}{3}},$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от формы сливной планки; k_2 – коэффициент, учитывающий сжатие потока стенками корпуса колонны.

Значения коэффициента k_1 в зависимости от формы переливной планки представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.9

Значение коэффициента k_1 для расчета переливной планки

Форма сливной планки	Значение коэффициента k_1
Прямая планка	2,8...3,2
Зубчатая планка с треугольными вырезами (угол при вершине 90°), высота которых не превышает подпора жидкости над сливом	6,13

Значения коэффициента k_2 можно определить, используя график на рис. 3.17.

Градиент уровня жидкости на колпачковой тарелке можно определить при помощи уравнения

$$\Delta_0^{1,5} + \frac{3n_p}{(1,5n_p - 1,4)} \left(h_{\Pi} + \Delta h + h_3 \left(\frac{l_{\text{ш}}}{l_c} - 1 \right) \right) \Delta_0^{0,5} - \frac{6,66 \cdot 10^3 B \cdot L_V n_p^{1,5}}{C l_c (1,5n_p - 1,4)} = 0, \quad (3.2)$$

где n_p (N) – число рядов колпачков на одном потоке жидкости; l_c – суммарное расстояние между колпачками в ряду, перпендикулярном потоку жидкости, мм; B – средняя ширина потока жидкости на тарелке, м; C – коэффициент.

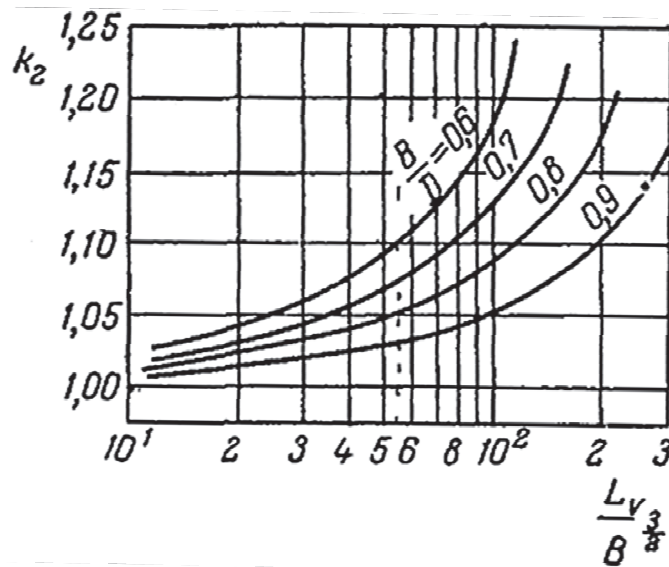


Рис. 3.17. График определения коэффициента k_2 : D – диаметр колонны, м; B – длина сливной планки, м (периметр слива Π); L_V – расход жидкости на единицу длины сливной планки, $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$

Коэффициент C определяют по рис. 3.18.

Уравнение (3.2) может быть решено методом последовательных приближений. Также градиент уровня жидкости на тарелке может быть определен по номограмме, представленной на рис. 3.19.

Для определения градиента уровня жидкости необходимо знать:

- $G_{\text{ж}}^l$ – нагрузку по жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$;
- $D, l_{\text{с.п}}$ (то же периметр слива Π) – диаметр колонны и длину сливной перегородки, м;
- d_k – диаметр колпачка, мм;
- N – число рядов колпачков на пути движения жидкости;
- s – шаг колпачка (отношение расстояния между колпачками к их диаметру).

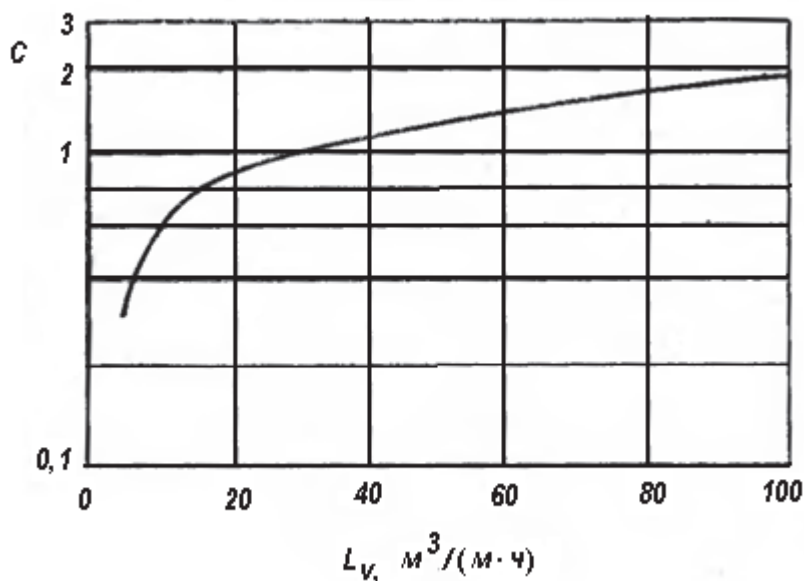


Рис. 3.18. Определение коэффициента C для расчета градиента уровня жидкости на тарелке

Правила работы с номограммой. Определение градиента уровня жидкости на тарелке проводят в следующей последовательности:

1) Из точки с координатой $\frac{2G'_{ж}}{D+l_{с.п.}}$ проводят горизонтальную линию до кривой с расчетной координатой $u\sqrt{\rho_{п}}$.

2) Находят точку пересечения построенной горизонтальной линии из точки с координатой $\frac{2G'_{ж}}{D+l_{с.п.}}$ с кривой с известным значением N .

3) Из точки с координатами $(N; \frac{2 \cdot G'_{ж}}{D+l_{с.п.}})$ проводят вертикальную линию до прямой со значением $s = 1,5$. Если значение шага колпачка s отличается от 1,5, то вдоль наклонных направляющих проводят линию до горизонтали с необходимым значением s .

4) Из точки на горизонтали с принятым значением s проводят вертикальную прямую до пересечения с прямой, соответствующей принятому значению диаметра колпачка d_k .

5) Затем из точки на прямой с принятым значением диаметра колпачка d_k проводят горизонтальную линию, а из точки с координатами $(u\sqrt{\rho_{п}}; \frac{2 \cdot G'_{ж}}{D+l_{с.п.}})$ проводят вертикалью линию. Точка пересечения построенных линий показывает значение градиента уровня жидкости на тарелке.

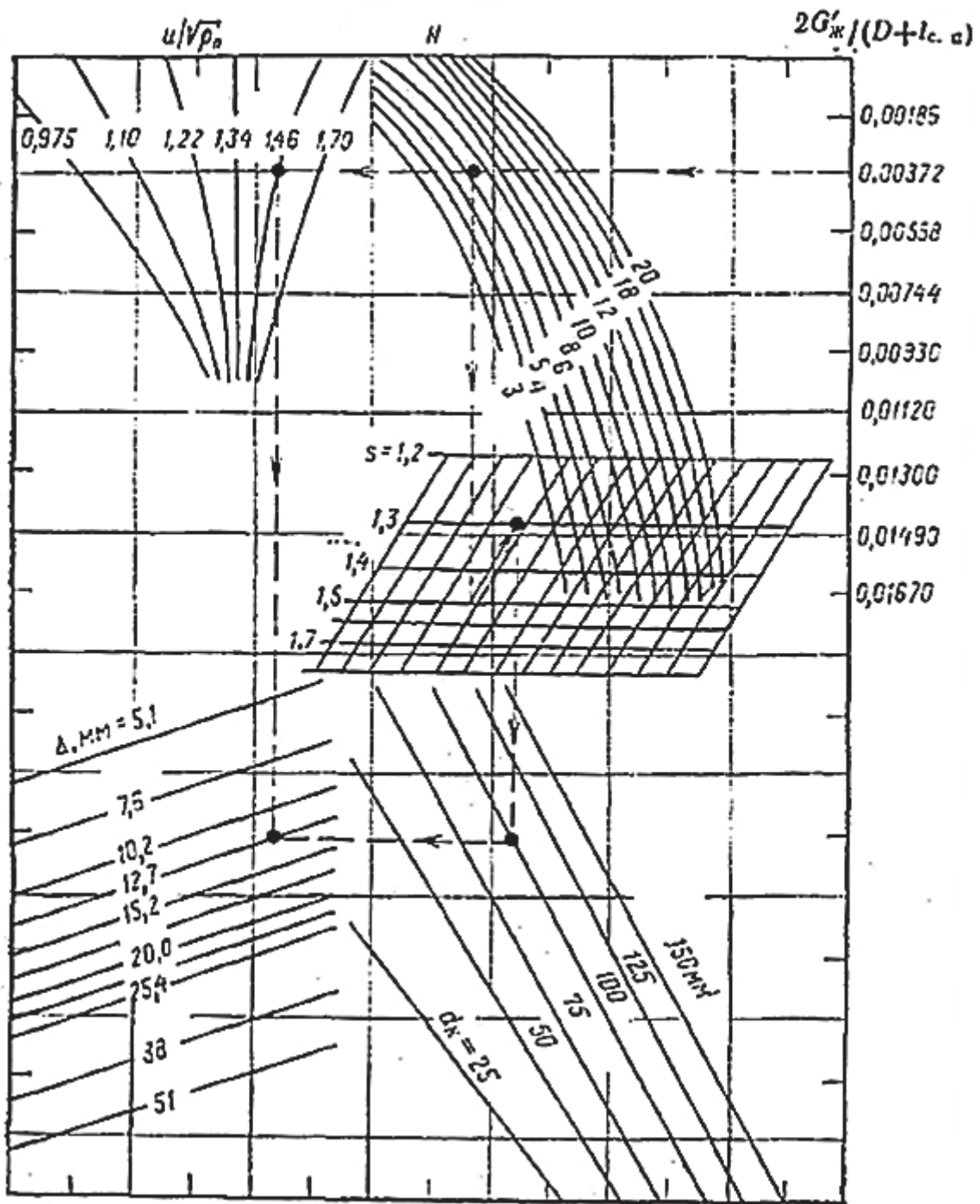


Рис. 3.19. Номограмма для определения градиента уровня жидкости Δ на тарелке с круглыми колпачками

Для тарелок *S*-образными элементами потеря напора газового потока в слое жидкости определяется по высоте слоя вспененной жидкости и дополнительному сопротивлению, вызванному трением газа о струи и капли жидкости, и рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{ж}} = \left(h_{\text{погр}} + \Delta h + 0,02(u_0 \sqrt{\rho_{\text{п}}})^{2,4} \right) d_{\text{ж}}$$

Для данного типа тарелок обычно принимают $h_{\text{погр}} = 27$ мм.

Для *клапанных* тарелок величина $\Delta P_{\text{ж}}$ определяется высотой слоя светлой жидкости на тарелке. Расчетное уравнение имеет вид

$$\Delta P_{\text{ж}} = (h_{\text{п}} + \Delta h)d_{\text{ж}}.$$

Для *ситчатых* тарелок $\Delta P_{\text{ж}}$ определяются высотой сливной планки и подпором жидкости над водосливом и рассчитывается по формуле

$$\Delta P_{\text{ж}} = \varphi(h_{\text{п}} + \Delta h)d_{\text{ж}}.$$

Коэффициент φ для технических расчетов принимает значение либо 1, либо 0,85.

Для *струйных* тарелок величина $\Delta P_{\text{ж}}$ зависит от расхода пара и жидкости. Величину сопротивления находят по уравнению

$$\Delta P_{\text{ж}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \Delta P_{\text{сух}} \left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{п}}} \right)^2 \rho_{\text{п}} d_{\text{ж}},$$

где $G_{\text{ж}}$ – расход жидкостного потока (в произвольном сечении колонны), кг/ч; $G_{\text{п}}$ – расход парового потока (в произвольном сечении колонны), кг/ч.

3.5. Унос жидкости с тарелок

Для тарелок колпачковых, с S-образными элементами, клапанных и ситчатых тарелок унос жидкости g (кг/кг жидкостного орошения) рассчитывают по уравнению

$$g = \frac{A(0,052 \cdot h_{\sigma} - 1,72)u}{H_{\text{T}}^{\beta} \psi^2 S_{\text{p}} m},$$

где A , β – коэффициенты, равные соответственно $9,48 \cdot 10^7$ и 4,36 при $H_{\text{T}} < 400$ мм; 0,159 и 0,95 при $H_{\text{T}} \geq 400$ мм; h_{σ} – глубина барботажа, мм; ψ – доля зеркала барботажа; S_{p} – относительная рабочая площадь тарелки, т.е. отношение площади тарелки к площади сечения колонны.

Долю зеркала барботажа ψ можно определить по табл. 3.10.

Таблица 3.10

Величина зеркала барботажа для контактных тарелок

Тип тарелки	Значение показателя
Тарелки колпачковые с туннельными колпачками	0,25...0,40
Тарелки колпачковые с круглыми колпачками	0,40...0,60
Тарелка с S-образными элементами	0,30...0,60
Тарелка клапанная	0,60...0,80
Тарелка ситчатая	0,80...0,90

Для ситчатых и клапанных тарелок глубина барботажа h_{σ} равна высоте светлой жидкости на тарелке. Для тарелок колпачковых и из S-образных элементов глубину барботажа определяют по выражению

$$h_{\sigma} = \Delta h + h_{\text{погр}} + h_{\text{откр}}.$$

При значении скорости пара в свободном сечении $u = 0,5 u_{\text{макс}}$ для каждого интервала принимают меньшие значения ψ , а большие – при максимальных расчетных значениях скоростей.

Коэффициент m рассчитывается по формуле

$$m = 5,63 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\sigma}{\rho_{\text{п}}} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}}} \right)^{0,425},$$

где σ – поверхностное натяжение на границе жидкость-пар, Н/м; $\mu_{\text{п}}$ – динамическая вязкость паров, Па·с.

Оптимальный унос, соответствующий минимальным затратам, сравнительно велик (0,2...0,4). Для технических расчетов оптимальный унос жидкости не должен превышать 0,1. Если унос выше допустимого, то необходимо увеличить расстояние между тарелками или уменьшить скорость паров, увеличивая диаметр, рабочую площадь и живое сечение тарелки.

Расчет гидравлического сопротивления клапанной прямоточной тарелки по методике ВНИИнефтемаш. Сопротивление клапанной прямоточной тарелки равно

$$\Delta P = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\text{ж}}. \quad (3.3)$$

При этом необходимо выполнение условия

$$\Phi_0 < \frac{h_{\text{п}}}{(5,2 - 0,0318\Delta h)\sqrt{d_{\text{ж}}}},$$

где $d_{\text{ж}}$ – относительная плотность жидкости.

Приведенный фактор пара определяется по уравнению

$$\Phi_0 = 2,25 \cdot K_{\text{с}} \cdot \left(\sqrt{H_{\text{э}}} - \frac{G_{\text{с.п}}}{\sqrt{H_{\text{э}}}} \right),$$

где $H_{\text{э}}$ – эффективное расстояние между тарелками, мм.

Эффективное расстояние между тарелками определяют по уравнению

$$H_{\text{э}} = H_{\text{т}} + \frac{h_{\text{п}}}{K'} - 2h_{\text{п}},$$

где $h_{\text{п}}$ – высота сливной перегородки, мм.

Коэффициент K' определяется по формуле

$$K' = \frac{2,3}{\left(\frac{G_{\text{ж}}}{G} \sqrt{\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}}}\right)^{0,125}}.$$

Расчетные формулы для определения гидравлического сопротивления сухой тарелки приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Рекомендации для расчета гидравлического сопротивления сухой тарелки

Вид уравнения	Примечание
$\Delta P_c = 17 \frac{\Phi_0^{0,25}}{d_{\text{ж}}^{0,875}}$	$\Phi_0 < \frac{13,4}{\sqrt{d_{\text{ж}}}}$
$\Delta P_c = 0,18\Phi_0^2$	$\Phi_0 \geq \frac{13,4}{\sqrt{d_{\text{ж}}}}$

Для расчета сопротивления тарелки с жидкостью используют следующие уравнения:

$$\Delta P_{\text{ж}} = A - 3,84\Phi_0\sqrt{d_{\text{ж}}} + 0,041(\Phi_0\sqrt{d_{\text{ж}}} + 8,66)(h_{\text{п}} + \Delta h),$$

если

$$\frac{3,6}{\sqrt{d_{\text{ж}}}} \leq \Phi_0 < \frac{8,66}{\sqrt{d_{\text{ж}}}},$$

и

$$\Delta P_{\text{ж}} = A - 3,84\Phi_0\sqrt{d_{\text{ж}}} + 0,71(h_{\text{п}} + \Delta h),$$

если

$$\Phi_0 \geq \frac{8,66}{\sqrt{d_{\text{ж}}}}.$$

Если выполняется неравенство

$$\Phi_0 \geq \frac{h_{\text{п}}}{(5,2 - 0,0318 \cdot \Delta h)\sqrt{d_{\text{ж}}}},$$

то сопротивление тарелки рассчитывается по уравнению

$$\Delta P = \Delta P_c \left(0,95 + \frac{0,175\Delta h}{\Phi_0\sqrt{d_{\text{ж}}}} \right).$$

Если выполняется неравенство

$$\Phi_0 < \frac{13,4}{\sqrt{d_{\text{ж}}}},$$

то сопротивление тарелки рассчитывается по уравнению

$$\Delta P = \Delta P_c \left(0,95 + \frac{2,34\Delta h}{\Phi_0^2 d_{\text{ж}}} \right).$$

Величину Δh рассчитывают по уравнению

$$\Delta h = 2,84 G_{\text{с.п.}}^{\frac{2}{3}}.$$

Расчет гидравлического сопротивления ситчатой тарелки с отбойными элементами по методике ВНИИнефтемаши. Гидравлическое сопротивление тарелок рассчитывается по формуле (3.3). Гидравлическое сопротивление сухой тарелки рассчитывается согласно формуле

$$\Delta P_c = \frac{0,079}{\rho_{\text{пен}}} \left(\frac{F_s}{S_{\text{св}}} \right)^2,$$

где $\rho_{\text{пен}}$ – абсолютная плотность вспененной жидкости, кг/м³; $S_{\text{св}}$ – относительное свободное сечение тарелки; F_s – фактор скорости, $F_s = u\sqrt{\rho_{\text{п}}}$.

Гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя рассчитывают по следующим уравнениям:

$$\Delta P_{\text{ж}} = \frac{2,95 G_{\text{с.п.}}^{0,48}}{\rho_{\text{пен}}^{0,28}},$$

если

$$\frac{F_s}{S_{\text{св}}} \leq 9,54 G_{\text{с.п.}}^{0,15} \rho_{\text{пен}}^{0,225},$$

и

$$\Delta P_{\text{ж}} = \frac{0,69 G_{\text{с.п.}}^{\frac{2}{3}} S_p^4}{\rho_{\text{пен}} F_s^2 S_{\text{св}}^2},$$

если

$$\frac{F_s}{S_{\text{св}}} > 9,54 \cdot G_{\text{с.п.}}^{0,15} \cdot \rho_{\text{пен}}^{0,225}.$$

Межтарельчатый унос жидкости рассчитывают по уравнению при $G_{\text{с.п.}} \leq 10 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$:

$$g = 2,7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{u}{S_p m} \right)^{4,7}.$$

При нагрузке жидкости $G_{\text{с.п.}} > 10 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$ унос жидкости с тарелок определяется по уравнению

$$g = 5,5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{u}{S_p m} \right)^{4,7}.$$

Коэффициент m , учитывающий физические свойства системы, рассчитывается по формуле

$$m = 5,63 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\sigma}{\rho_{\text{п}}} \right)^{0,295} \left(\frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}}{\mu_{\text{п}}} \right)^{0,425}.$$

Высота газожидкостного слоя в переливе определяется по формуле

$$H'_{\text{п}} = 2 \cdot h'_{\text{св}}.$$

Уровень светлой жидкости в переливе рассчитывается согласно уравнению

$$h'_{\text{св}} = h_{\text{п}} + \Delta h + \Delta h_{\text{п}} + \Delta P.$$

Высота подпора жидкости над входным порогом определяется по уравнению

$$\Delta h = 2,84 G_{\text{с.п}}.$$

Гидравлическое сопротивление перелива рассчитывается в соответствии с уравнением

$$\Delta h_{\text{п}} = 250 \left(\frac{G_{\text{с.п}}}{3600a} \right)^2.$$

4. РАСЧЕТ ТАРЕЛОК БЕЗ ПЕРЕЛИВНЫХ УСТРОЙСТВ

Предельную скорость пара в колонне определяют по уравнению

$$\frac{u_{\text{пред}}}{gbS_{\text{св}}^2} = A \left(\frac{\rho_{\text{ж}} b}{g\mu_{\text{ж}}} \right)^{0,15} \left(\frac{\sigma}{\rho_{\text{ж}} b^2} \right)^{0,6} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{-1,36} \left(\frac{\mu_{\text{п}}}{\mu_{\text{ж}}} \right)^{-0,14} \left(\frac{D}{b} \right)^{0,5} \left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{п}}} + 0,05 \right)^{-0,78},$$

где D – диаметр колонны, м; $\mu_{\text{п}}$, $\mu_{\text{ж}}$ – динамический коэффициент вязкости соответственно паровой и жидкой фазы, Па·с; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м.

Коэффициент A принимает значение $9,4 \cdot 10^{-3}$ для тарелок с шириной щели 3 мм и $6,5 \cdot 10^{-3}$ для тарелок с другими размерами щелей.

Допустимая (максимальная) скорость паров в колоннах с решетчатыми провальными тарелками можно определить по уравнению

$$u_{\text{макс}} = S_{\text{св}} \sqrt{\left(\Delta P_{\text{ж}} - \frac{\beta}{1 - \beta} \frac{2\sigma}{b} \right) \frac{2(1 - a_s)^3 (1 - \beta)}{\xi \rho_{\text{п}} \beta}},$$

принимая $\Delta P_{\text{ж}} = 250 \dots 350$ Па.

Максимальную скорость паров возможно определить другим способом по формуле

$$u_{\text{макс}} = 0,118 \left(\frac{G_{\text{п}}}{b} \right)^{0,111} \frac{S_{\text{св}}^{0,89} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}} \right)^{0,604}}{\left(0,77 \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{п}}} + 1 \right)^{0,445}},$$

где $G_{\text{ж}}, G_{\text{п}}$ – массовые расходы жидкости и пара соответственно, кг/ч; b – ширина щели, мм.

Оптимальная и минимальная скорости паров вычисляются по уравнению

$$u = \sqrt{\left(\frac{1 - \beta}{\beta} \Delta P_{\text{ж}} - \frac{2\delta}{b} \right) \frac{S_{\text{св}}^2 (1 - a_s)^3 2g}{\xi \rho_{\text{п}}}},$$

где $\Delta P_{\text{ж}}$ – гидравлическое сопротивление жидкостному потоку, равное при расчете $u_{\text{опт}}$ 25...35 мм рт.ст. и при расчете $u_{\text{мин}}$ 10 мм рт.ст.; β – коэффициент, учитывающий интенсивность пенообразования; ξ – коэффициент сопротивления сухой тарелки; a_s – доля свободного сечения тарелки, занятая стекающей жидкостью, м²/м²; δ – толщина тарелки, мм; g – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент, учитывающий пенообразование, определяется по формуле

$$\beta = 1,11 \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,118}.$$

Коэффициент сопротивления сухой тарелки рассчитывается по уравнению

$$\xi = 1,75 (1 - S_{\text{св}})^2 \left(\frac{b}{\delta} \right)^{0,2}.$$

Величина a_s рассчитывается по уравнению

$$a_s = \frac{\sqrt[3]{\left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{п}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{п}}}{(\rho_{\text{ж}} \xi k_{\text{и}}^2)}}}{1 + \sqrt{\left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{п}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{п}}}{(\rho_{\text{ж}} \xi k_{\text{и}}^2)}}},$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент истечения, $k_{\text{и}} = 0,62$.

Гидравлическое сопротивление паровому потоку можно рассчитать по формуле

$$\Delta P_{\text{п}} = \frac{\xi u^2 \rho_{\text{п}} [1 - a_s (1 - \beta)]}{S_{\text{св}}^2 2g (1 - \beta) (1 - a_s)^3} + \frac{2\sigma}{b(1 - \beta)}.$$

Расстояние между тарелками должно превышать сумму высот вспененного слоя жидкости на тарелке H_{Π} и сепарационного пространства H_c :

$$H_T \geq H_{\Pi} + H_c,$$

$$H_c = 2,14 \cdot 10^3 u_{\max} \left(\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5},$$

$$H_{\Pi} = \frac{\Delta P_{\text{ж}}}{d_{\Pi}},$$

где d_{Π} – относительная плотность пены.

Относительная плотность пены определяется по формуле

$$d_{\Pi} = \frac{\rho_{\text{пен}}}{\rho_{\text{ж}}},$$

где $\rho_{\text{пен}}$ – абсолютная плотность пены, кг/м³.

Гидравлическое сопротивление жидкостному потоку определяется по уравнению

$$\Delta P_{\text{ж}} = \frac{\beta}{1 - \beta} \left[\frac{\xi u_{\max}^2 d_{\Pi}}{S_{\text{св}}^2 2g(1 - a_s)^3} + \frac{2\sigma}{b} \right].$$

Для тарелок со щелями шириной $b \leq 9$ мм и плотности пара $\rho_{\Pi} \leq 12$ кг/м³ $d_{\Pi} = 0,2$. И. А. Александров указывает на то, что в режимах работы тарелки до режима захлебывания d_{Π} принимает значения $0,2 \dots 0,4$ [7].

Унос жидкости определяют по уравнению

$$g = 0,00014 \cdot \left(\frac{u \cdot m}{H_c} \right)^{2,56}.$$

Для провальных тарелок унос жидкости меньше, чем для тарелок с переливными устройствами, за счет осаждения брызг жидкостью, стекающей с вышележащей тарелки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В современной химической, нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности широко используются процессы разделения и очистки различных технологических потоков. Одними из основных процессов, относящихся к данной группе, являются ректификация и абсорбция.

Для осуществления таких процессов важным условием является организация контакта потоков внутри аппарата. Таким образом, правильно выбранный тип контактного устройства (тарельчатого контактного устройства), верно принятые решения по проектированию основных элементов и расчету технологических режимов работы тарелки обеспечивают максимальную эффективность работы колонного аппарата, высокую сте-

пень разделения (очистки) и качества получаемых продуктов, сокращение материала на изготовление аппарата в целом.

Представленный материал полезен и может быть использован при разработке методик гидравлического расчета новых современных конструкций тарелок с переливами.

Материал учебного пособия ориентирован на студентов, обучающихся по направлениям и специальностям, связанным с проектированием в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Учебное пособие может быть использовано студентами при выполнении расчетно-графических заданий, курсовых и дипломных проектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фарамазов, С. А. Оборудование нефтеперерабатывающих заводов и его эксплуатация / С. А. Фарамазов. – М. : Химия, 1978. – 352 с.
2. Молоканов, Ю. К. Процессы и аппараты нефтегазопереработки : учеб. для техникумов / Ю. К. Молоканов. – М. : Химия, 1980. – 408 с.
3. Скобло, А. И. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии : учеб. для вузов / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 677 с.
4. Поникаров, И. И. Машины и аппараты химических производств и нефтепереработки : учеб. / И. И. Поникаров, М. Г. Гайнуллин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Альфа-М, 2006. – 608 с.
5. Технологические расчеты установок переработки нефти : учеб. для вузов / М. А. Танатаров и др. – М. : Химия, 1987. – 352 с.
6. Проектирование установок первичной переработки нефти / М. А. Танатаров, А. А. Кондратьев, М. Н. Ахметшина, М. И. Медведева. – М. : Химия, 1976. – 200 с.
7. Александров, И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования / И. А. Александров. – 3-е изд., перераб. – М. : Химия, 1978. – 280 с.
8. Александров, И. А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования / И. А. Александров. – М. : Химия, 1971. – 296 с.

Учебное издание

Кириллов Алексей Витальевич

**РАСЧЕТ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ
ТАРЕЛЬЧАТЫХ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие

Научный редактор – доктор технических наук, профессор В. В. Петров

Редактор Т. Н. Карпова

Подписано в печать 20.02.2014.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага 65 г/м². Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,06. Тираж 50 экз. Заказ 26086.

Редакционно-издательский отдел

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.