

Анализ гидродинамических схем работы распределительных тарелок современных конструкций реакторов гидроочистки нефтепродуктов

В.В. Ленчевский, А.С. Пинаев, Г.В. Шевченко, Р.Ф. Галлиев
(ООО «Научно-производственная фирма «Рифинг»)

На современном этапе проектирования реакторов гидроочистки нефтепродуктов аксиального типа различные фирмы применяют разные конструкции внутренних распределительных устройств; информация об их эффективности, как правило, отсутствует. По информации, содержащейся в рекламных материалах и коммерческих предложениях, зачастую трудно оценить эффективность, при этом иногда есть основания сомневаться в заявленных характеристиках. Публикуемые в сравнении с некоторыми другими конструкциями относительные параметры могут быть даны без указания абсолютных значений и способов их получения.

Современные требования, предъявляемые к продуктам нефтепереработки, такие, как уменьшение содержания серы до 5 ppm к 2010 г., заставляет подходить к проектированию внутренних конструкций реакторов с позиции обеспечения выполнения целого ряда требований, максимально обеспечивающих достижение поставленной цели.

Ряд важных моментов, выступающих в настоящее время на передний план проектирования (равномерность распределения поля скоростей на входе в слой катализатора и стабильность работы тарелки), в них вообще не затрагиваются. Есть основание полагать, что распределительные тарелки разной конструкции обладают различной гидродинамической эффективностью.

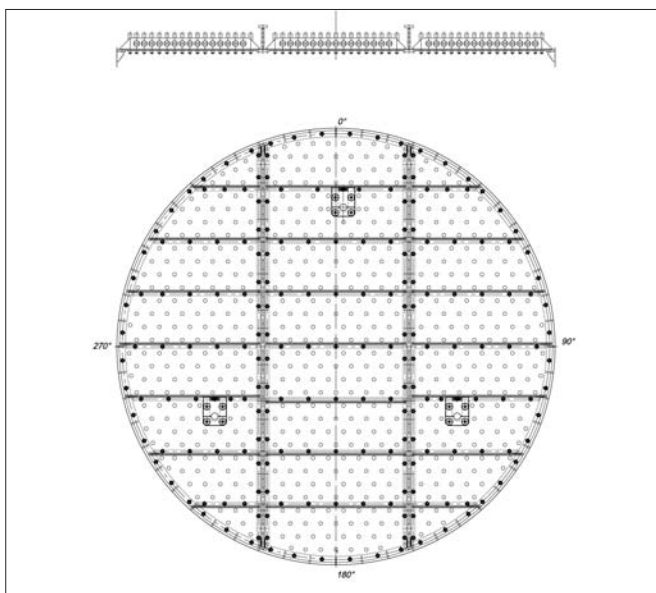


Рис. 1. Типовая конструкция распределительной тарелки

В ходе анализа будем считать, что защитные функции от попадания механических примесей в катализатор тарелки выполняют одинаково, а распределительные функции в части размещения распределителей по площади тарелки реализованы равномерным их размещением рядами с шагом 100...120 мм по площади тарелки с образованием фигур в виде правильных треугольников или квадратов (рис. 1).

Работу тарелки и ее свойства напрямую определяет конструкция распределителя. Работа распределителя по вводу и выводу потока обеспечивает различные функциональные свойства распределителя и тарелки в целом. Так, конструктивное оформление входной части распределителя обуславливает схему подачи жидкой и газовой фаз в распределитель, а конструкция выходной части в совокупности со схемой размещения по площади тарелки обеспечивают характеристики поля скоростей потока на входе в слой катализатора.

Учитывая сказанное, для дальнейшего рассмотрения возьмем ряд современных тарелок и их распределительных устройств следующих конструкций (рис. 2):

- вариант 1 (фирма А, рис. 2, а);
- вариант 2 (фирма S, рис. 2, б);
- вариант 3 (фирма H, рис. 2, в);
- вариант 4 (фирма «Рифинг», рис. 2, г).

Обобщая опубликованную информацию, а также результаты собственных проработок, можно выделить

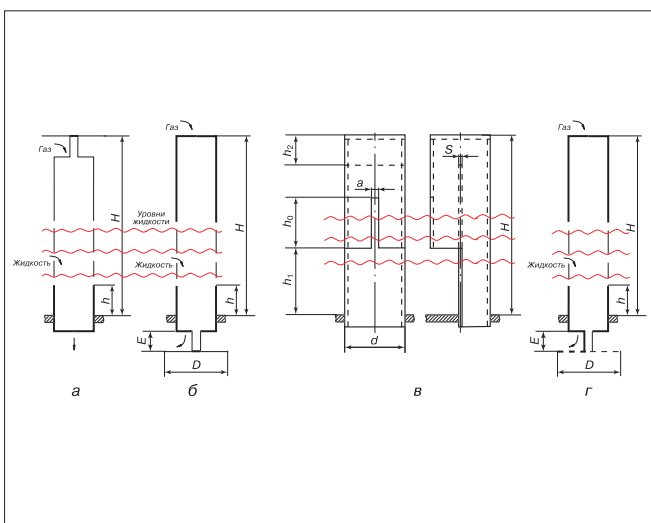


Рис. 2. Варианты конструкции тарелок и распределительных устройств, принятые к рассмотрению:

а – вариант 1 (фирма А); б – вариант 2 (фирма S); в – вариант 3 (фирма H); г – вариант 4 (фирма «Рифинг»)

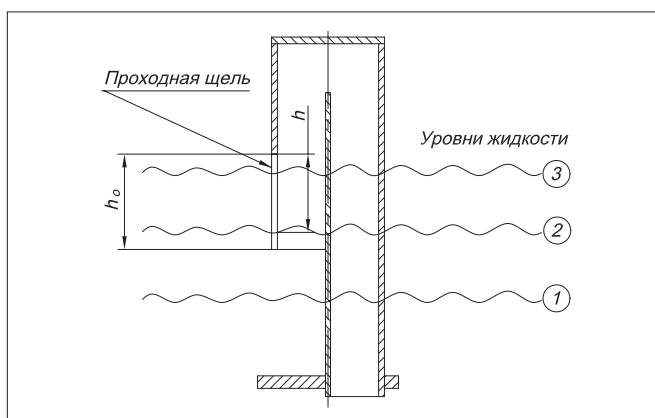


Рис. 3. Пароподъемный распределитель

следующие характеристики, которые можно трактовать как свойства распределительных тарелок:

- чувствительность к нарушению горизонтальности;
- чувствительность к отложениям механических примесей;
- возможность возникновения явления «захлебывания»;
- величина гидравлического сопротивления;
- формирование равномерного поля скоростей на входе в слой катализатора.

Естественно, следует ожидать, что эта совокупность характеристик в своих положительных качествах обеспечит наилучшую работу реакторов с гидродинамической точки зрения, т.е. формирование на любых режимах работы реактора равномерного потока сырья в поперечном сечении реактора на входе в слой катализатора. Дальнейшее движение потока по слою катализатора в данном анализе затрагиваться не будет.

Рассмотрим конструктивные оформления входной и выходной частей распределителей. Конструкции входных участков распределителей вариантов 1, 2, 4 схожи: открытый или прикрытый защитным козырьком прямой патрубок с системой боковых на разных уровнях отверстий для подачи жидкости в газовый поток внутри патрубка. Эти конструкции обеспечивают отдельную и независимую подачу жидкости и газового потока в распределитель.

Конструкция входной части пароподъемного распределителя варианта 3 [1] имеет принципиальное отличие: входной канал имеет П-образную форму; в поперечном сечении он может иметь различную конфигурацию. На входной части корпуса имеется вертикальная щель (или щели) высотой h_0 . Конструкция входной части напоминает модернизированный колпачковый распределитель с боковыми щелями. В этой конструкции подача жидкости и газа происходит через одно проходное сечение и возможно их взаимное влияние, что будет подробно рассмотрено далее.

Выходные части распределителей также различны: варианты 1 и 3 имеют свободные открытые патрубки, варианты 2 и 4 имеют рассекатели разной конструкции. Эффективность их работы также будет рассмотрена далее.

Рассмотрим гидродинамическую схему забора жидкости в пароподъемном распределителе несколько подробнее.

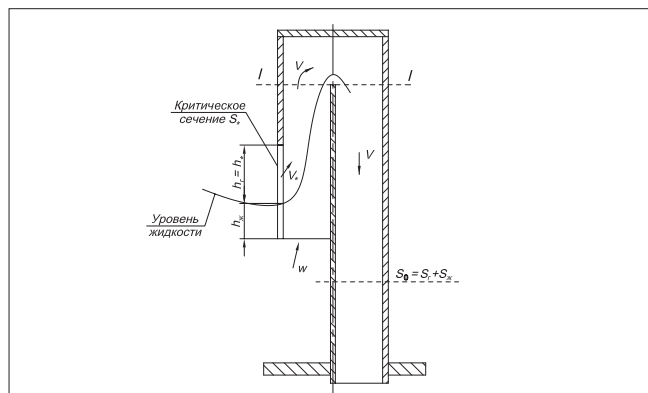


Рис. 4. Гидродинамическая схема пароподъемного распределителя

В процессе работы формирующийся уровень жидкости может находиться на разной высоте по отношению к срезу входного патрубка (рис. 3). При положении уровня 2 и 3 остается открытой боковая проходная щель переменной высоты. Перепад давления, формируемый распределительной тарелкой, действует через распределитель и на локальную зону жидкости в зоне проходного сечения заборника. Скорость подъема жидкости w определяется общим перепадом давления на тарелке Δp_r , а расход жидкости – долей площади поперечного сечения патрубка или проходного сечения щели, т.е., если S_0 – площадь поперечного сечения патрубка на выходе (рис. 4); S_r – площадь сечения газовой струи, $S_{ж}$ – площадь сечения потока жидкости, то

$$S_0 = S_{ж} + S_r .$$

Поскольку внутри входной части патрубка в зоне забора между потоками газа и жидкости имеется четкая динамическая граница, ее форму можно представить картиной, показанной на рис. 4, при этом критическим сечением, определяющим расход газа через распределитель, становится боковая проходная щель или щели, общей площадью S .

При высоте щели h_0 и высоте жидкости над нижним краем щели $h_{ж}$ расход газа q_r через открытую часть щели определяется зависимостью:

$$q_r = V_* S_*$$

где V_* – скорость потока в щели; $S_* = k_m a (h_0 - h_{ж}) = k_m a h_r$; k_m – переводной коэффициент для учета размерностей; a – ширина щели; $h_r = h_0 - h_{ж}$.

Таким образом, расход газа через распределитель определяется положением уровня жидкости в щели, т.е. величиной открытой части проходного сечения щели, а расход жидкости определяется долей площади, входной части патрубка по линии I – I (см. рис. 4).

В силу изменения положения уровня жидкости эжектирование начнется с момента установления критического сечения в районе свободной поверхности, т.е. при $S_0 = S_{ш}$, где $S_{ш}$ – проходное сечение полностью открытой щели. Максимальная оценка для площади зоны потока жидкости в контрольном сечении I – I получается из условия сохранения расходов в критическом

ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА

сечении и сечении I – I, откуда следует

$$S_* = S_r.$$

Это условие жесткое, оно дает оценку площади при условии сохранения структуры ядра струи вдоль потока от проходной щели до сечения I – I, хотя известно, что затопленные струи имеют свойство увеличивать свои поперечные размеры вдоль оси струи. Тогда для расхода жидкости $q_{ж}$ через единичный распределитель справедлива зависимость от высоты жидкости $h_{ж}$ в щели или высоты открытой части щели h_r :

$$q = w(S_0 - S_r) = w(S_0 - k_m h_r a) = w[S_0 - k_m a(h_0 - h_{ж})],$$

что при $S_0 = k_m h_0 a$ дает $q_{ж} = w k_m h_{ж} a$.

Полученная зависимость далее будет применена при расчете показателя «чувствительность» тарелки.

Из зависимостей расходов жидкости и газа в критическом сечении распределителя следует, что увеличение высоты жидкости может привести к перекрытию проходного сечения щели для ввода газа, поскольку отсутствует обратная связь уровня жидкости с механизмом его ввода в реактор. Такого рода явления в гидродинамике называют «захлебыванием», в данном случае распределителя. Естественно, в силу увеличения площади проходного сечения для жидкости, ее расход в этот момент достигает максимума при тех же перепадах давления.

«Захлебывание» одного или группы распределителей приведет к перераспределению подачи жидкости и газа по площади тарелки, увеличению гидравлического сопротивления вследствие уменьшения суммарной площади проходного сечения тарелки для газового потока, и как следствие, к увеличению перепада давления на тарелку в целом. Увеличение перепада давления на тарелку приведет к росту скоростей потока и расходов, и, следовательно, к понижению уровня жидкости.

Таким образом, весьма вероятно, что сформируется нестационарный пульсационный режим работы как одиночных распределителей, так и всей тарелки в целом, что можно считать главным отрицательным моментом в работе пароподъемной тарелки.

Вероятно, баланс осаждающейся жидкости и жидкости, уносимой газовой струей, может быть достигнут при небольших расходах жидкости, но этот режим требует тщательного экспериментального определения и формулировки рекомендаций по его обеспечению.

Отметим, что такого рода явления на рассмотренной выше группе распределителей вариантов 1, 2, 4 не может реализоваться в принципе.

Перейдем к анализу отмеченных выше свойств тарелок.

Чувствительность к 10-миллиметровому отклонению тарелки от горизонтали

По рекламным материалам фирмы *H* чувствительность предлагается определять по формуле

$$u = (q_n - q_b/q_{cp})100\%,$$

где q_n , q_b – расход жидкости через распределитель соответственно при нижнем и верхнем положении уровня жидкости.

Рассмотрим два распределителя, находящихся на противоположных концах диаметра тарелки и имеющих конструкцию вариантов 1, 2, 4. На одном распределителе уровень жидкости из-за перекоса поднят на высоту 5 мм относительно среднего уровня, на другом опущен на 5 мм. Расход жидкости через систему отверстий в патрубках распределителей обуславливается гидростатическим давлением p_i в слое жидкости на уровне отверстия, которое определяется высотой столба жидкости над отверстием:

$$p_i = \rho g h_i,$$

где ρ – плотность жидкости при рабочих условиях в реакторе; g – ускорение свободного падения; h_i – высота столба жидкости над отверстием.

Поскольку изменение гидростатического давления приведет к изменению скорости истечения жидкости через отверстие, изменятся расходы жидкости на рассматриваемых распределителях. Если h_{cp} – некоторый средний уровень жидкости, Δh – максимальное отклонение (в рассматриваемом случае 10 мм), то скорость истечения жидкости через отверстие определяется формулой

$$v_i = \mu \sqrt{2g h_i},$$

где μ – коэффициент расхода для отверстия; $h_i = h_{cp} \pm \Delta h/2$.

Для распределителей с верхним, нижним и средним уровнями жидкости расходы определяются соответственно зависимостями

$$q_b = S_f \mu \sqrt{2g(h_{cp} + \Delta h/2)};$$

$$q_n = S_f \mu \sqrt{2g(h_{cp} - \Delta h/2)};$$

$$q_{cp} = S_f \mu \sqrt{2g h_{cp}},$$

где S_f – площадь отверстий для подачи жидкости.

Подставляя эти зависимости в выражение для определения чувствительности, после несложных преобразований получим

$$u = \left(\sqrt{1 + \frac{\Delta h}{2h_{cp}}} - \sqrt{1 - \frac{\Delta h}{2h_{cp}}} \right) 100\%.$$

Так как $\Delta h/2h_{cp} \leq 1$, то, оставляя в разложениях в ряды Фурье члены первого порядка малости, данное выражение упрощается:

$$u = (\Delta h/2h_{cp})100\%.$$

Очевидно, что чувствительность u обратно пропорциональна уровню жидкости h_{cp} . Так, при $h_{cp} = 50$ мм, $u = 10\%$, а при $h_{cp} = 100$ мм $u = 5\%$. Поскольку рабочие слои жидкости находятся в этом диапазоне, то полученные данные говорят о слабой чувствительности этой группы тарелок к отклонению от горизонтали.

Для пароподъемной тарелки с распределителями варианта 3, вводя в зависимость $q_{ж} = wk_{н}h_{ж}a$ некоторый средний уровень $h_{ж} = h_{ср}$ высоты жидкости в щели и отклонения от него $\Delta h = \pm 5$ мм, после подстановки в выражения для определения чувствительности u нетрудно получить зависимость для ее определения:

$$u = 2\Delta h/h_{ср} = (10/h_{ср})100\%.$$

Для различных $h_{ср}$ получаются следующие значения чувствительности:

$h_{ср}$, мм	25	30	40	50
u , %	40	33,3	25	20

Как видно из приведенных данных, значения показателя «чувствительность» для пароподъемной тарелки во-первых, имеют большие значения, во-вторых, увеличиваются с уменьшением высоты проходной щели, что не соответствует данным, приведенным в информационных материалах. Сравнение показывает, что для группы тарелок с прямыми входными патрубками чувствительность значительно ниже чувствительности тарелки с пароподъемными распределителями.

Чувствительность к отложениям

С теоретической точки зрения накопление механических отложений при использовании тарелок с распределителями вариантов 1, 2, 4 приводит только к повышению уровня жидкости или к росту общей толщины слоя «отложения + жидкость», что существенно не влияет на показатель чувствительности.

Иная ситуация у тарелки с пароподъемными распределителями (вариант 3). Накопление отложений автоматически поднимает уровень жидкости, и уже на ранних стадиях работы реактора становится возможным появление всех отрицательных моментов, отмеченных выше. Более того, этот процесс не поддается ни контролю, ни управлению.

Возможность возникновения явления «захлебывания»

Из проведенного анализа следует, что данное явление вероятнее всего может реализоваться только на тарелке с пароподъемными распределителями. Формирование режима, на котором бы достигался баланс осаждающейся жидкости и жидкости, уносимой струей, требует экспериментального определения и формулировки рекомендаций по его обеспечению.

Гидравлическое сопротивление

Как известно, гидравлическое сопротивление тарелки определяется зависимостью

$$\Delta p = \xi(\bar{f})q_r,$$

где $\xi(\bar{f})$ – коэффициент гидравлического сопротивления; \bar{f} – коэффициент проходного сечения тарелки; q_r – средний скоростной напор потока сырья в поперечном сечении реактора.

Типовые зависимости $\xi(\bar{f})$ показывают увеличение по какому-либо закону коэффициента гидравлического сопротивления при уменьшении площади проходного сечения тарелки [2]. В связи с этим уменьшение проходного сечения должно приводить к возрастанию пе-

репада давления на тарелке, что может реализоваться на тарелке с пароподъемными распределителями (вариант 3), особенно при достижении режима «захлебывания». В конечном итоге процесс прохождения потока приведет к росту амплитуд пульсаций давления и перепадов давления по всему реактору в целом.

Группа тарелок с распределителями вариантов 1, 2, 4 таким недостатком не обладают. Изменение гидравлического сопротивления связано в основном с изменением режима подачи сырья, т.е. с увеличением расхода, что учитывается при проектировании внутренних устройств реакторов.

Таким образом, первые четыре названные выше свойства формируют и характеризуют условия работы самой тарелки, ее временные параметры, такие как стационарность работы. Эти свойства косвенным образом участвуют в формировании структуры потока на входе в слой катализатора. Непосредственную структуру потока определяет последнее, пятое свойство.

Возможность формирования равномерного поля скоростей на входе в слой катализатора

Эта возможность обеспечивается как схемой размещения системы отверстий на тарелке, так и конструктивным оформлением выходного сечения распределителя. Для рассматриваемой группы распределителей они различны (см. рис. 2): варианты 1 и 3 имеют открытые выходные срезы патрубков, варианты 2 и 4 – рассекатели струй разной конструкции.

Анализу структур потоков, формируемых рассматриваемыми распределителями, по результатам проведенных экспериментальных исследований, посвящена статья [3]. Эксперименты с визуализацией потоков показали, что распределители вариантов 1 и 3 с открытыми выходными срезами патрубков формируют ярко выраженную струйную структуру потоков, воздействующую непосредственно на поверхность слоя.

Распределитель варианта 2, имеющий рассекатель в виде диска, как показали проведенные исследования, формирует вихревые структуры, т.е. не обладает оптимальными характеристиками.

Конструкция распределителя с рассекателем варианта 4 обеспечивает наилучшее разбиение струй и выравнивание поля скоростей потока в поперечном сечении реактора на входе в слой катализатора, то есть устраняет все отмеченные выше недостатки и является в этом плане оптимальной конструкцией [3].

Таким образом, проведенный комплексный анализ показал, что по совокупности рассмотренных свойств наилучшими характеристиками обладает распределительная тарелка фирмы «Рифинг» с распределителями варианта 4, обеспечивающая как стабильность работы тарелки и реактора в целом в широком диапазоне расходов, так и хорошую равномерность поля скоростей на входе в слой катализатора, и создающая условия для максимального использования возможностей катализатора.

Список литературы

1. Патент США, US 005942162A.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
3. Ленчевский В.В. и др. Обоснование выбора рассекателя форсунки оптимальной конструкции для распределительных тарелок реакторов химических и нефтехимических производств // Нефтепереработка и нефтехимия. 2005. № 6.