

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 66.047.375

### ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАСSEКАТЕЛЯ ФОРСУНКИ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТАРЕЛОК РЕАКТОРОВ ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

В.В. Ленчевский, Г.З. Сулейманов, А.С. Пинаев, Г.В. Шевченко  
(ООО «Научно-производственная фирма «Рифинг»)

Современные требования по качеству продуктов нефтепереработки, в частности по содержанию вредных примесей (например серы), заставляют искать новые пути повышения эффективности технологических процессов и совершенствования внутренних устройств реакторов, содержащих слои катализаторов.

В настоящее время применяются современные распределительные тарелки с большим количеством трубчатых форсунок, конструктивное исполнение которых различными зарубежными фирмами-производителями реакторного оборудования прямо противоположно. Так, некоторые фирмы применяют в реакторах форсунки открытого типа, т.е. на выходе — прямой открытый срез трубы, тогда как другие — закрывают выходное сечение патрубка форсунки плоским рассекателем, устанавливая его на расстоянии 0,1-0,25 диаметра патрубка, формируя тем самым истечение из боковой кольцевой щели. Естественно ожидать от этих форсунок формирования различных полей течения в зоне между тарелкой и поверхностью слоя.

Настоящая статья посвящена экспериментальным исследованиям структуры потока в зоне между тарелкой и слоем катализатора, формируемой различными форсунками, а также выбору оптимальной конструкции рассекателя форсунки и его расположения относительно среза патрубка. В исследованиях был использован метод визуализации потока, часто применяемый в гидродинамике.

Типовая конструкция распределительной тарелки приведена на рис. 1.

Диапазон изменения параметров общего газожидкостного потока при входе в реакторы на экспериментальной установке:

Расход:	
массовый, т/ч .....	40-140
объемный, м <sup>3</sup> /ч .....	2000-6000
Плотность, кг/м <sup>3</sup> .....	23,5-45,7
Давление, МПа .....	1,0-6,0
Температура, °С .....	250-450
Показатели динамической вязкости	
газовой части потока, сП .....	0,027-0,0324

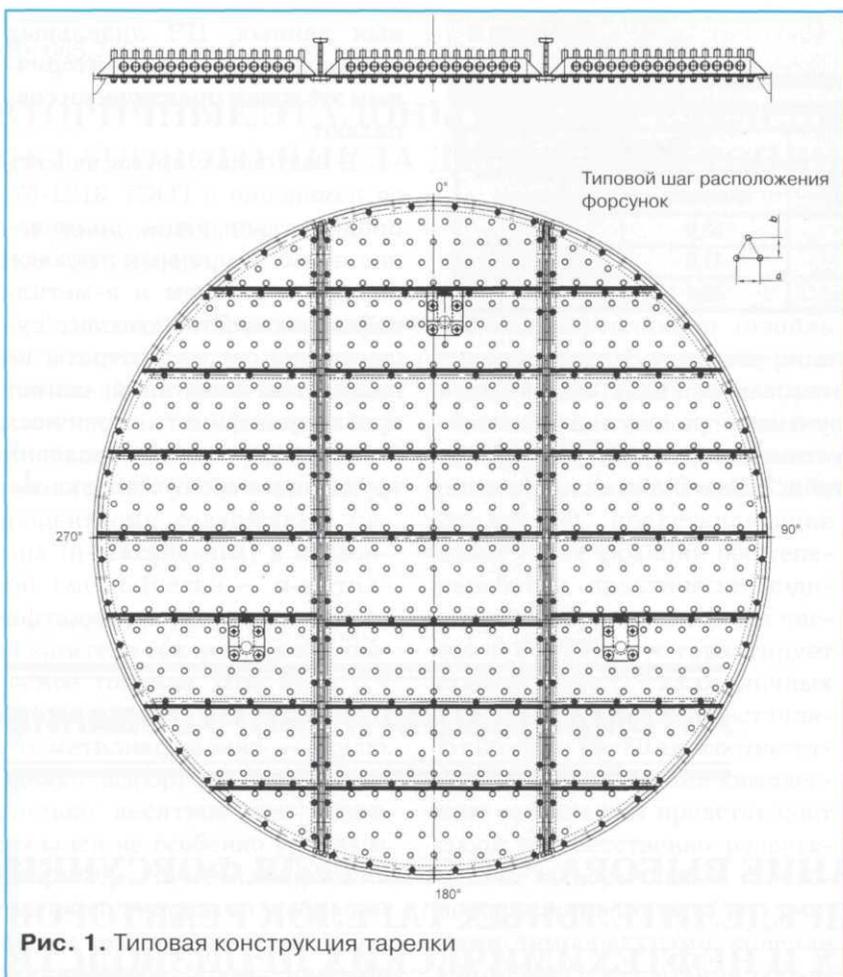


Рис. 1. Типовая конструкция тарелки

Поток подается на тарелку высокодисперсного распределения, имеющую степень перфорации 2-3%, с равномерным расположением форсунок по площади тарелки. Соответствующие скорости потока в патрубках форсунок обеспечиваются заданием степени перфорации тарелки и составляют 2,4-4,15 м/с для указанного диапазона расхода.

Экспериментальная установка разработана, исходя из требований обеспечения визуализации потока с последующей видеорегистрацией в темпе эксперимента.

Поскольку течение происходит при высоком давлении и температуре, то реализация этих условий в ходе экспериментальной работы требует отдельного рассмотрения.

Так, из гидрогазодинамики известно, что структуры пото-

ков характеризуются числами, определяемыми для течения в рассматриваемой зоне: *Рейнольдса*  $Re = Vd/\nu$ , где  $V$  - скорость потока,  $d$  - характерный линейный размер,  $\nu$  - кинематическая вязкость; *Эйлера*  $Ei = P/\rho V^2$ , где  $P$  - давление; *Фруда*  $Fr = V^2/gL$ , где  $g$  - ускорение свободного падения,  $L$  - линейный размер.

Эти параметры являются коэффициентами безразмерных уравнений Навье-Стокса, описывающих течения в данном случае в рабочей зоне реактора. Равенство их при подобной или идентичной геометрии двух или нескольких конструкций будет обеспечивать идентичность решений уравнений Навье-Стокса, а значит - физических параметров течений при проведении какого-либо рода работ, т.е. подобие или равенство всех пара-

метров полей скоростей, давлений и т.д.

Опыт гидрогазодинамики показывает, что для подобного рода течений в зоне между распределительной тарелкой и слоем катализатора влияние критериев подобия - чисел Фруда и Эйлера практически не сказывается. Структура потока определяется в основном числом Рейнольдса, т.е. влиянием сил вязкости, поэтому при определении параметров экспериментальной установки исходили из требования равенства чисел Рейнольдса для потоков в натуральных (в реакторах) и экспериментальных условиях, что обеспечивало бы идентичность картины течений в исследуемых зонах.

Число Рейнольдса для рассматриваемой зоны течения целесообразно определить по параметрам патрубка форсунки: внутреннему диаметру  $d_0$  и скорости потока через форсунку  $V$ .

Остановимся на выборе вида потока как рабочей среды и сравним соответствующие показатели кинематической вязкости  $\nu$ . Среднее значение для рабочего потока в реакторах:

$$\nu_{cp} = 0,9875 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

Соответствующие значения для воздуха и воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ :

$$\begin{aligned} \nu_{\text{воды}} &= 1,0 \cdot 10^{-6}; \\ \nu_{\text{воздуха}} &= 18,09 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Сравнивая кинематические вязкости рабочего потока в реакторе, воды и воздуха, видим практическое совпадение их значений для рабочей среды и воды. Отсюда следует, что числа Рейнольдса, определенные для зоны реактора и экспериментальной установки, будут совпадать при следующих условиях:

- идентичности геометрии форсунок и исследуемой зоны течения;

- рабочем теле, формирующим поток в экспериментальной установке, — воде;
- равенстве скоростей потоков через форсунки в натуральных и экспериментальных установках.

При реализации этих условий в экспериментальной установке структуры потоков, их динамика и другие показатели, полученные в ходе экспериментальной работы, будут идентичны процессам, протекающим в реакторах в рабочих условиях их эксплуатации. При этом не требуется создание высоких давлений и поддержание высоких температур.

Геометрический облик экспериментальной установки определен из следующих условий. Благодаря симметрии размещения форсунок по площади тарелки, каждая из них имеет свою зону влияния, ограниченную с боковых сторон шестью зонами от соседних форсунок с аналогичными же параметрами, внутри которой и формируется структура течения. Взаимодействие с соседними потоками от других форсунок происходит по общим границам зоны. Для получения картины течения в зоне действия форсунки с учетом влияния соседних зон осуществлена «вырезка» рабочей зоны по глубине от тарелки до слоя катализатора с тремя расположенными по одной линии форсунками, при этом выбор направления этой линии в плоскости тарелки в силу симметрии расположения форсунок значения не имеет.

Общий вид сформированной таким образом экспериментальной установки ТМ-001.000 показан на рис. 2. Установка имеет верхнюю съемную прозрачную панель и поперечную металлическую вставку, на которой смонтированы три форсунки со сменными рассекателями. К каждой форсунке под-

ведена магистраль для подачи подкрашенной жидкости в патрубках форсунки для визуализации картины течения. Под-



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки ТМ-001.000

крашенная жидкость подается из отдельной емкости под давлением. В качестве рабочей среды использовалась, как определено выше, вода. Установка рассчитана на работу под давлением до 0,1 МПа.

Экспериментальная работа на установке ТМ-001.000 проводилась в составе аттестованного эталонного проливочного стенда УРП-250, предназначенного для проверки средств измерений для нужд теплотехники. Стенд оснащен средствами измерения и автоматикой для создания и поддержания расходов и скорости потока воды с требуемой точностью.

Из большого многообразия вариантов рассекателей форсунок были выбраны пять наиболее перспективных функционально

и технологичных в изготовлении и монтаже. Для сравнения проведены испытания с форсунками европейских фирм «А» и «В», краткие характеристики которых приведены в таблице.

Общий вид всех испытанных форсунок приведен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид всех испытанных форсунок

Для каждого варианта рассекателя в ходе испытаний варьировалась скорость потока в трубке форсунки, м/с: 2,4; 3,3; 4,15.

Структуры потоков в течение 300 с регистрировались портативной видеокамерой и после компьютерной обработки превращались в компьютерные видеофильмы и кадровые файловые структуры с частотой 50 кадров/сек.

Видеокадры типичных структур течений, формируемых форсунками с вариантами рассекателей, приведены на рис. 4.

Вариант	Диаметр рассекателя $d_p$	Место установки $h$	Степень перфорации рассекателя $n$ , %	Примечание
1	$d_0^*$	$0,25 d_0$	0	Форсунка фирмы «А»
2	Без рассекателя			Форсунка фирмы «В»
3	$1,5 d_0$	$d_0$	15	
4	$1,5 d_0$	$d_0$	27	
5	$1,5 d_0$	$1,5 d_0$	15	
6	$d_0$	$0,25 d_0$	25	Вариант 1 с перфорированным рассекателем
7	Рассекатель в виде конуса с центральным отверстием			Угол конусности — 70°; диаметр отверстия 7 мм

\*  $d_0$  — внутренний диаметр патрубка форсунки.

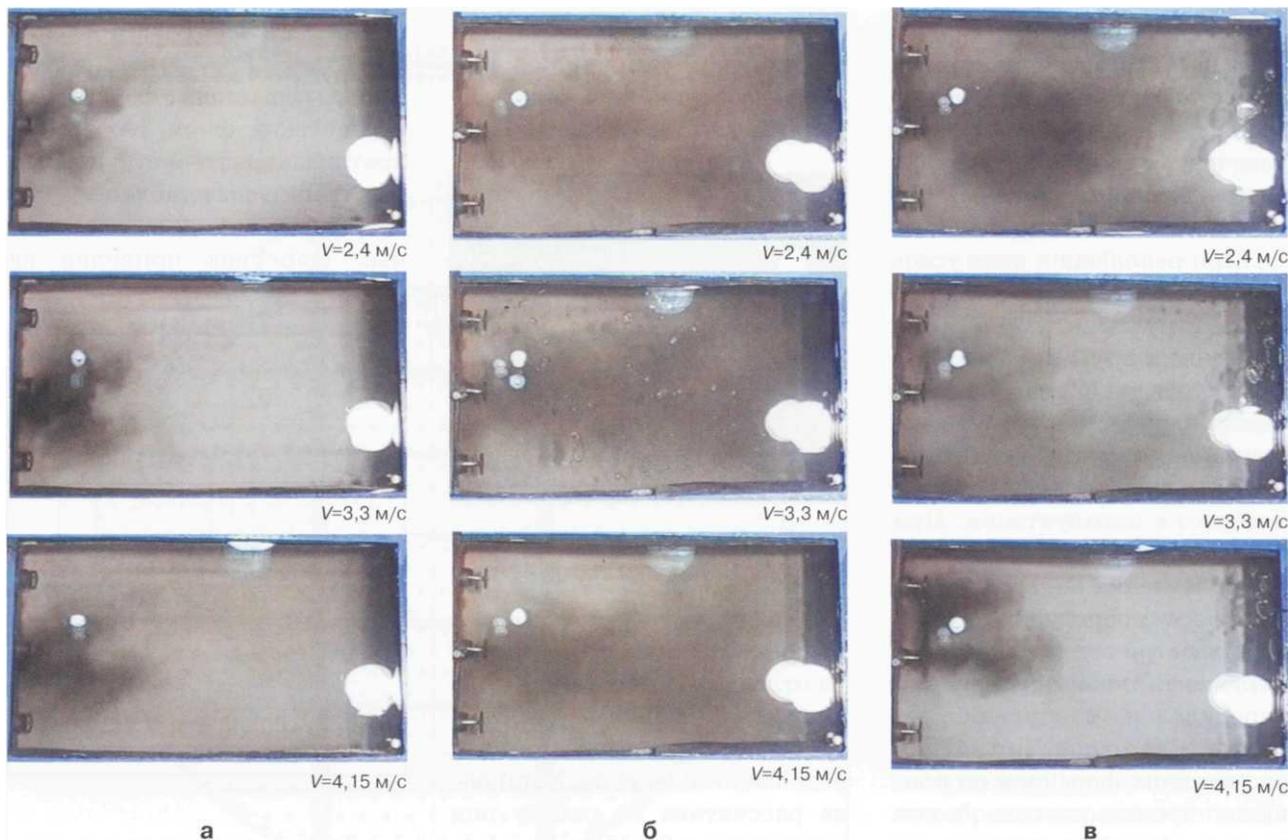


Рис. 4. Видеокadres типичных структур течения, формируемых форсунками: а – фирмы «А»; б – с рассекателем (степень перфорации 15%); в – с рассекателем (степень перфорации 27%)

Необходимо отметить, что скорости потока по форсункам формировались и поддерживались системами стенда стационарными в течение всего времени проливки конкретного варианта, тогда как для всех вариантов рассекателей и режимов течения в исследуемой зоне формировались нестационарные картины течения с различными линейными масштабами турбулентности и параметрами вихревых структур, что и соответствует числам Рейнольдса  $\sim 2,5 \cdot 10^5$ .

**Вариант 1** (рис. 4а). Форсунка фирмы «А». Структуры течения характеризуются формированием вихревых зон за рассекателем. Увеличение скорости потока (увеличение расхода), как видно из сравнения картин течения между собой, приводит к увеличению размеров этих зон, более всего в сторону увеличения их размера по потоку.

**Вариант 2.** Форсунка фирмы «В» без рассекателя. Структура течения имеет вид классической затопленной струи с хорошо изученными параметрами и структурой. Поэтому на любом расстоянии от струй среза форсунок в поперечном сечении реактора будет реализовываться существенно неравномерное (пульсирующее) поле скоростей, что является отрицательным моментом, поскольку такое интенсивное струйное воздействие на поверхность слоя катализатора может привести к движению его отдельных частиц, и в итоге сформирует в зоне между форсунками и слоем пространственную вихревую структуру из частиц -- своего рода «пескоструйку».

Варианты 3–7 рассекателей являются экспериментальными.

**Вариант 3** (рис. 4б). Рассекатель в виде перфорированного диска со степенью перфорации 15%, диаметром  $d = 1,5d_0$

( $d_0$  – внутренний диаметр форсунки), установленный на расстоянии  $h = d_0$  от среза патрубков. Картина течения характеризуется равномерным расширением вниз по потоку со слабой турбулентной структурой, т.е. со слабыми возмущениями скоростей в поперечном сечении струи, что можно принять за необходимую структуру течения. Увеличение скорости потока приводит к увеличению масштаба турбулентности, но до приемлемых величин, т.е. не формируются обширные вихревые структуры с обратными течениями.

**Вариант 4** (рис. 4в). Отличается от варианта 3 увеличением степени перфорации до 27%. Увеличение перфорации привело к увеличению расхода среды по средней части потока за рассекателем, что хорошо видно на кадрах. Положительным результатом является то, что в целом сохранилась спо-

койная (слабовозмущенная) структура течения по сравнению с вариантом 3.

**Вариант 5.** Рассекатель по геометрии и степени перфорации аналогичен варианту 3, но его размещение изменено - - увеличено на калибр расстояние от среза патрубка:  $h = 2d_0$ . Поскольку режим течения нестационарный, мелкомасштабные вихревые структуры иногда перерастают в крупномасштабные, особенно часто это происходит при увеличении скорости потока, что по сравнению с вариантами 3 и 4 ведет к ухудшению течения.

**Вариант 6.** Представляет собой рассекатель фирмы «А», перфорированный на 25%.

По сравнению с вариантом 1 (без перфорации) эти вихревые структуры имеют измененную геометрию, более вытянутые формы по потоку, т.е. рассекатель не обеспечивает выравнивание поля скоростей в потоке за рассекателем.

**Вариант 7.** Рассекатель выполнен в виде конуса с центральным отверстием и установлен непосредственно на срезе патрубка форсунки. Как следует из видеogramм, для всех скоростей поток имеет вихревую структуру, подобную течениям за рассекателем варианта 6, что не обеспечивает выполнение поставленной задачи по выравниванию поля скоростей.

Таким образом, при сравнении структуры течений, формируемых всеми рассмотренными вариантами форсунок, видно, что наибольшую равномерность структуры потока или наименьшую турбулентность обеспечивают форсунки с рассекателями вариантов 3 и 4. Данный рассекатель представляет собой перфорированный диск с диаметром, равным 1,5 диаметра проходного сечения форсунки, со степенью перфорации 15-27% и расположен по оси форсунки на расстоянии  $h = d_0$ .

Учитывая очевидные преимущества в формировании потока в целом за распределительной тарелкой реактора, а также технологичность изготовления данный вариант рассекателя (3, 4) рекомендован для использования в конструкции форсунки в составе распределительной тарелки в целом.

Данное техническое решение реализовано при изготовлении в апреле 2004 г. внутреннего корпусного устройства для шести реакторов установки гидроочистки вакуумного газойля и февраля 2005 г. — двух реакторов установки гидроочистки дизельного топлива.

По описанному техническому решению подана заявка на выдачу патента.