

# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА ОАО «ГИПРОГАЗООЧИСТКА» С ПОДОГРЕВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГАЗА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СРЕДСТВАМИ ПК FLOWVISION

Кузнецов К.В., Маркова Т.В., Тишин А.П.  
ООО «ТЕСИС»

Установки производства серы (УПС) из технологического газа, получаемого при добыче и переработке нефти, широко распространены на разных нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ).

Как правило, в УПС присутствует термический подогреватель газа и каталитический реактор. Объединение этих двух аппаратов в один технологически оправдано и экономически целесообразно.

В ходе разработки новой конструкции УПС с подогревателем, объединенным с каталитическим реактором (рис.1), необходимо было выполнить ряд работ:

- выбрать в качестве подогревателя горелочное устройство типа ГГВ и адаптировать его для сжигания сероводорода;
- выбрать рациональную конструкцию проточной части аппарата в зоне подачи технологического газа (ТГ) и его смешения с продуктами горения;
- проверка показателей работы выбранной конструкции аппарата на различных режимах.

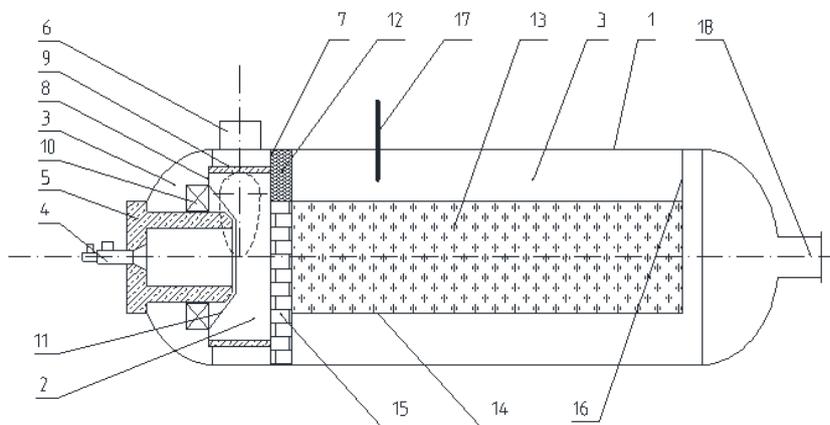


Рис.1 Установка производства серы (УПС).

1 - каталитический реактор; 2 - зона подогрева технологического газа; 3 - каталитическая зона; 4 - горелочное устройство; 5 - фор-камера; 6 - тангенциально расположенный штуцер; 7,8 - кольцевые заглушки; 9 - цилиндрическая вставка; 10 - кольцевой завихритель; 11 - конический конфузор; 12 - распределительное устройство; 13 - слой катализатора; 14 - опорная решетка; 15,16 - стенки; 17 - термодатчик; 18 - выходной штуцер

## Выбор горелочного устройства

В качестве горелочного устройства была выбрана вихревая горелка ГГВ-25 работающая на природном газе (ПГ) [1], как имеющая наибольший коэффициент рабочего регулирования (6,3) и в тоже время обеспечивающая необходимый подогрев технологического газа (ТГ) при его расходе 7740 нм<sup>3</sup>/час (2,4 кг/с). Эскиз горелки ГГВ-25 представлен на рис.2.

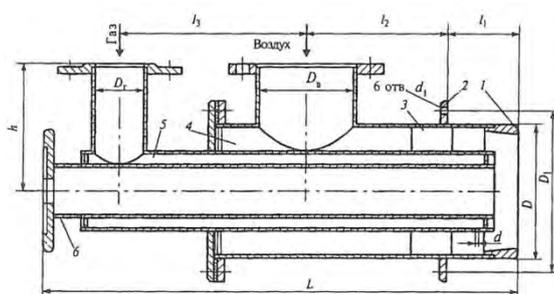


Рис.2 Эскиз горелки ГГВ-25 [1].

1 – огневой насадок с пережимом; 2 – фланец; 3 – лопатки; 4 – воздушная камера; 5 – газовая камера; 6 – смотровая труба.

Необходимость моделирования средствами FlowVision выбранной горелки для установки ее на УПС была обусловлена тем, что:

- данный тип горелок был разработан около 25-30 лет назад, когда средства вычислительной гидродинамики были еще, по современным меркам, примитивны, а эксперименты давали только самые общие внешние показатели работы;

- горелка типа ГТВ, предназначенная для работы на атмосферном давлении должна работать при избыточном давлении в реакторе, куда подаются продукты сгорания горелок, которое составляет около 0,5 атм.
- в продуктах сгорания горелки не должно быть свободного кислорода. Согласно условиям разработчика ГТВ нормальное горение обеспечивается при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=1,03\dots 1,04$ , в условиях же работы в реакторе эта величина должна быть меньше единицы, например  $\alpha=0,99$ .

Для обеспечения работоспособности данной горелки и на сероводороде (ГСВ-0,28) были учтены те же условия, что и для горелки, работающей на природном газе, а также требование возможно меньшего давления сероводорода на входе в горелку. Это было удовлетворено выбором площади газовыпускных отверстий с настолько большим диаметром, насколько это было возможно с позиции обеспечения качества перемешивания горючего с воздухом. Были рассмотрены различные варианты количества и диаметров газовыпускных отверстий. Их суммарная площадь должна быть возможно большей, чтобы снизить перепад давления, но достаточно малой, чтобы скорость струи газа обеспечила ее необходимое проникновение в поток воздуха. Это стандартная задача проектирования горелки и в рассматриваемом случае она успешно решается моделированием средствами FlowVision.

После проработки ряда вариантов был принят вариант с 32 отверстиями диаметром 2,5 мм, удовлетворяющий отмеченным требованиям. Эскиз горелки ГСВ-0,28 представлен на рис.3 и результаты моделирования на рис.4-6.

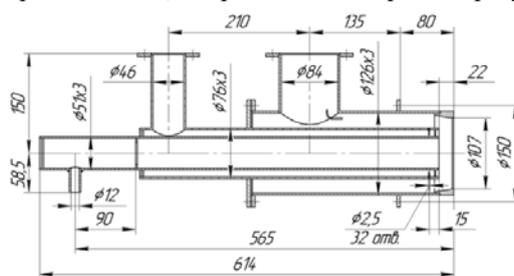


Рис.3 Эскиз горелки ГСВ-0,28

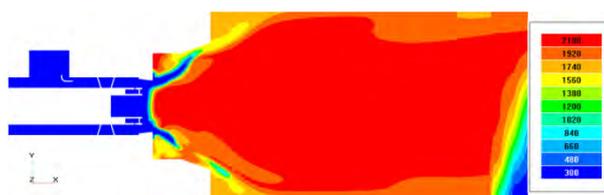


Рис.4 Температура [K]

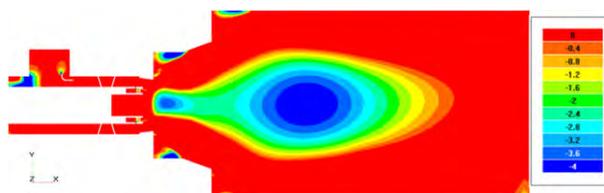


Рис.5 Осевая скорость  $U_x$  [м/с]

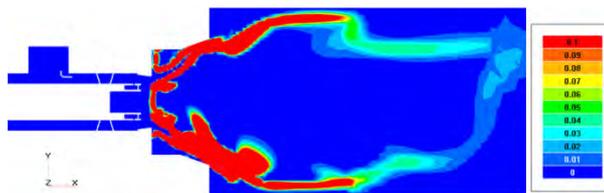


Рис.6 Скорость выгорания топлива [кг/м<sup>3</sup>с]

Таким образом, согласно результатам моделирования, показатели горелки ГСВ-0,28 удовлетворяют требованиям при работе на номинальной нагрузке  $D_{НОМ}$ .

Проверка моделированием работы горелки на других режимах, показала ее работоспособность в диапазоне  $D=(0,3\dots 1,2) D_{НОМ}$ .

### Разработка конструкции реактора

Целью поиска был выбор конструкции проточной части реактора - от ввода технологического газа (ТГ) в реактор до входа его, подогретого в результате смешения с горячими продуктами сгорания, в область катализатора.

Основные требования к показателям работы конструкции состояли в следующем:

- однородность ТГ по температуре ( $\pm 5$  °С от номинальной 260 °С) и по скорости поступающего на слой катализатора;
- возможно малый перепад давления на участке между входом в реактор и объемом над слоем катализатора;

- исключение нагрева металлических деталей горячими продуктами сгорания (ПС);
- доступность всех узлов области смешения для монтажа и, при необходимости, ремонта;
- минимизация количества различных узлов и деталей, обеспечивающих процесс перемешивания;
- отсутствие в проточной части решеток с малым сечением каналов, чтобы исключить сильное искажения их возможными твердыми осадениями

- возможность изготовления всех элементов конструкции при использовании оборудования, имеющегося на типичных предприятиях по изготовлению и ремонту нефтехимического оборудования.

Отправным вариантом для моделирования был принят вариант, представленный в ТЗ (рис.1).

В ходе работы варианты конструкции проточной части смесителя и полученные результаты моделирования обсуждались непосредственно с сотрудниками Заказчика ОАО «ГИПРОГАЗОЧИСТКА» (М.С.Немировский, В.П.Свиридов), хорошо знающими отраслевую специфику и способствовавшими получению конструкции, отвечающей отраслевым нормам.

На начальном этапе разработки при выборе конструкции для обеспечения лучшего перемешивания при минимальных потерях давления руководствовались известными методами гидродинамики: например, придерживались правила, чтобы скорость на любом из участков тракта не сильно превышала скорость во входном патрубке (10 м/с). Для обеспечения качественного перемешивания смеси, обычно недоперемешанной в области оси, устанавливались решетки, цилиндры, шторки и другие элементы, но, обычно, с недостаточно хорошим результатом.

Решение поставленной задачи оказалось нелегким и трудоемким.

Всего было исследовано 195 вариантов конструкции, прежде чем удалось найти приемлемое решение. Количество расчетных ячеек в задаче составляло от 500 тысяч до 950 тысяч, иногда более 1 миллиона. Время расчета на типичном персональном компьютере (частота процессора около 3 ГГц, количество ядер процессора 4, объем оперативной памяти 24 Гбайт) составляло 4...5 суток непрерывной работы. При использовании суперкомпьютера (8 проц. по 4 ядра) задача решалась менее, чем за сутки.

Переломным ходом в работе стало использование закрутки потока ТГ в смесителе при интенсивности крутки, достаточной для образования возвратного течения вблизи оси. Такой тип течения оказался хорошим смесителем, без дополнительных элементов в проточной части.

### Конструкция проточной части реактора-подогревателя

Конструкция проточной части реактора-подогревателя представлена в эскизе общего вида на рис.7.

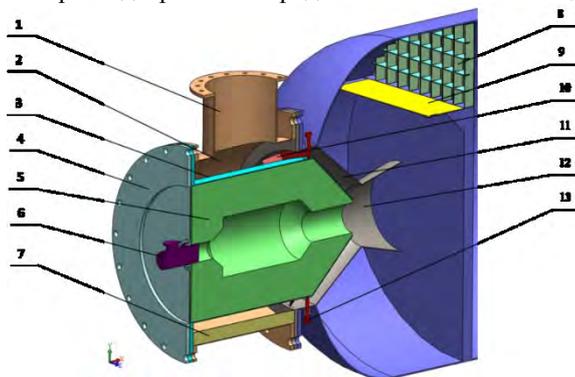


Рис.7 Принятый вариант конструкции проточной части реактора-подогревателя.

- 1- входной штуцер; 2- коллектор; 3-обечайка форкамеры; 4- крышка форкамеры; 5- огнеупорный камень; 6- горелка; 7- лопатка; 8-решетка; 9- полка; 10 - закручивающие лопатки; 11- смеситель; 12 – конус; 13 опорный болт.

Технологический газ поступает по трубе с внутренним диаметром 512 мм, перпендикулярно оси реактора в кольцевой коллектор (наружный диаметр 1200 мм, внутренний 903 мм).

Из коллектора ТГ поступает в осевом направлении в кольцевой канал смесителя, в котором установлены 16 прямых лопаток под углом 45° к оси реактора.

Смеситель состоит из упомянутого выше кольцевого канала, конического канала 2, и после горловины - расширяющегося конуса.

Внутри входного коллектора находится горелочный туннель, набираемый из блоков, изготовленных из огнеупорного материала, находящихся внутри стальной обечайки – цилиндра диаметром 903 мм и конуса, имеющего угол наклона образующей 45°.

Горячие продукты сгорания поступают по каналу диаметром 200 мм и вблизи горловины входят в контакт с ТГ. Благодаря закрутке потока ТГ и образованию возвратного течения вблизи оси, на участке от горловины до стенки, отделяющей зону катализатора, два газа перемешиваются. При этом горячий газ нигде не входит в контакт с металлом. Даже на разделительную стенку, имеющую покрытие из жаростойкого торкрет-бетона толщиной 70 мм, поступает газ, температура которого не превышает 200 0С.

От стенки газ, перетекая через полку шириной 300 мм, поступает в сегмент, соединяющий зону подогрева с зоной реактора. В этом сегменте (высота 550 мм) установлена решетка из ячеек 100x100x76 мм, на «дне» которых есть отверстия диаметром 60 мм. Эта решетка выравнивает поток, поступающий в зону катализатора. Потери полного давления на решетке при работе на номинальном режиме составляют около 200 Па. Суммарные потери полного давления - от входа до зоны катализатора составляют около 800 Па.

Специально выполненное моделирование процесса в смесителе со смещенным туннелем, когда ось реактора и ось туннеля находились на расстоянии 7 мм, показало, что эта несоосность не ухудшила показатели качества перемешивания и параметры потока на входе в зону катализатора. Иными словами, конструкция нечувствительна к погрешностям монтажа, если, например, отклонение осей будет менее 3...5 мм.

### Параметры потока газов в проточной части каталитического реактора

Расчетная сетка во всей проточной части реактора представлена на рис. 8. В тех областях, где протекающие процессы характеризуются большими градиентами скорости и концентрации, размеры расчетных ячеек уменьшались. Минимальная ячейка имеет размер 28 мм.

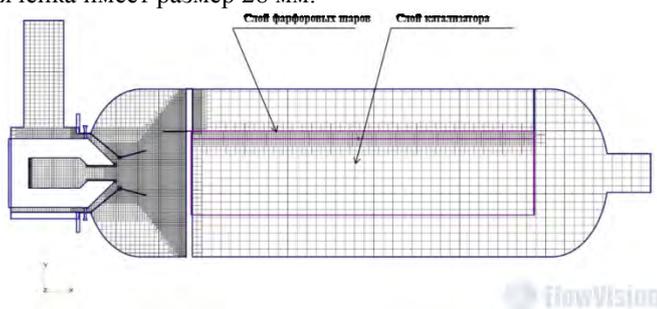


Рис.8 Общий вид расчетной сетки (продольное сечение, количество расчетных ячеек 950 тыс.)

Поле скоростей газов в зоне смешения показано на рис. 9. Отчетливо видна структура потока – раскрывающийся поток ТГ и внутри него зона возвратного течения. В области контакта этих двух потоков генерируется интенсивная турбулентность (рис. 10.), обеспечивающая и глобальное и локальное перемешивание газов.

У смесителя может быть удален расширяющийся конус без качественного изменения процесса. Но без него поток колеблется, взаимодействуя с потоком в зоне катализатора. При наличии конуса процесс становится более стабильным.

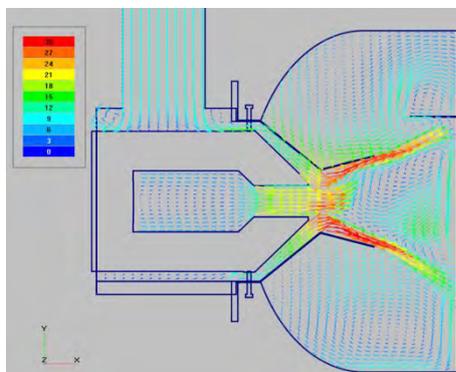


Рис.9 Векторное поле скоростей в зоне смешения, [м/с].

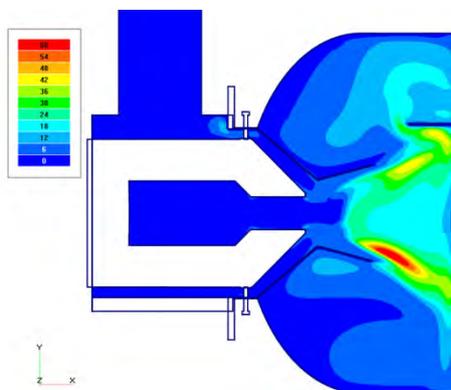


Рис.10 Скалярное поле турбулентной энергии в зоне смешения, [м²/с²].

Поле давления в реакторе показано на рис. 11. Как можно видеть общий перепад давления - от входа до зоны катализатора составляет около 800 Па. Отметим, что это в 1,5...2 раза меньше, чем для других рассмотренных вариантов конструкции.

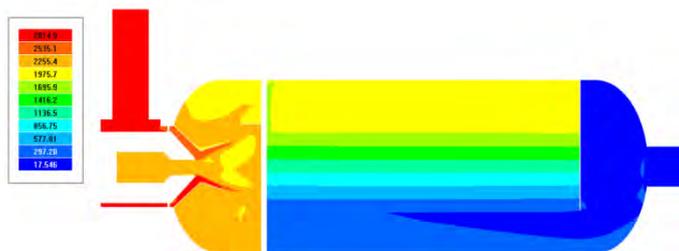


Рис.11 Скалярное поле давления , [Па].

Поле температуры газов представлено на рис. 12. Можно видеть, как быстро, в малой области – от горловины смесителя до разделительной стенки – газы перемешались и температура смеси находится в узком диапазоне. На подходе потока к выравнивающей решетке перед зоной катализатора температура смеси близка к однородной.

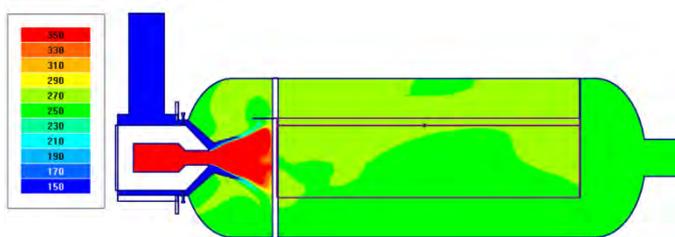


Рис. 12 Скалярное поле температуры, [°C].

Более детальная картина представлена на рис. 13, где дано поле температуры непосредственно над слоем фарфоровых шаров. Как можно видеть, смесь весьма однородна, и отклонение от средней температуры не превышает 3 °C. После прохождения слоя шаров температура еще более выравнивается (рис. 14).

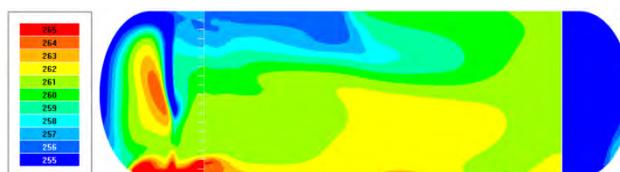


Рис. 13 Температура в газе над слоем фарфоровых шаров (горизонтальное сечение), [°C].

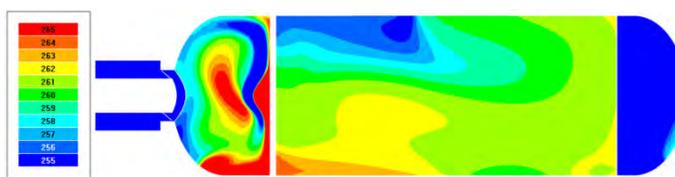


Рис. 14 Температура в верхнем слое катализатора после прохождения слоя фарфоровых шаров (горизонтальное сечение), [°C]

Вертикальная скорость газов непосредственно над слоем шаров приведена на рис. 15. Как видно, она весьма однородна.

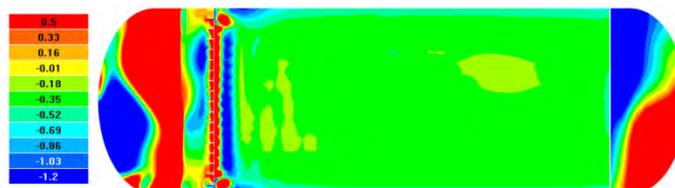


Рис. 15 Вертикальная компонента скорости в газе над слоем фарфоровых шаров (горизонтальное сечение), [м/с].

Как можно видеть, все значения рассматриваемых параметров находятся в узком диапазоне вблизи номинальных значений.

**Показатели работы реактора на режимах, отличных от номинального.**

Согласно условиям ТЗ должна быть проверена возможность работы реактора при нагрузках 30% и 120% от номинальной.

Проведенное моделирование показало, что на режимах 25% и 120% от номинального, показатели работы, характеризующиеся температурой и скоростью газов в зоне катализатора не хуже, чем приведенные выше для номинальной нагрузки.

### **Результаты работы**

В соответствии с Техническим заданием выполнены работы:

- Адаптация горелки ГГВ-25 к условиям работы в подогревателе.
- Проработка конструкции горелки для работы на сероводороде  $H_2S$  в качестве горючего.
- Проектная проработка конструкции проточной части реактора.

Выбранная схема и параметры смесителя обеспечивают высокое качество перемешивания горячих продуктов сгорания и технологического газа (ТГ) и равномерную скорость натекания подогретого ТГ на слой катализатора.

При этом обеспечивается тепловая защита всех элементов конструкции, потери давления от входа ТГ в реактор до катализатора не превышают 800 Па, а отклонение температуры ТГ от средней не превышает  $\pm 3$  °С.

- Подтверждение работоспособности реактора при изменении расхода ТГ от 25% до 120% от номинального

В результате была спроектирована УПС с подогревателем объединенным с каталитическим реактором. ПК FlowVision показал исключительную эффективность в решении задач подобного рода, и позволил во многом сократить время на разработку новой конструкции.

### **Литература.**

1. Витовкин А.А. и др. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочное издание. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 496 с.
2. Технический отчет по этапу 2 «Моделирование и выбор оптимальных параметров горелки типа ГГВ для работы на сероводороде в реакторе производительностью  $7 \cdot 10^3$   $nm^3/час$ ». М.: ОАО «ТЕСИС», 2013
3. Технический отчет по этапу 1,3 «Разработка конструкции проточной части термокаталитического реактора ОАО «ГИПРОГАЗООЧИСТКА» с подогревом технологического газа на основе численного моделирования средствами ПК FLOWVISION». М.: ОАО «ТЕСИС», 2014.