

**Черниговская Марина Алексеевна**,  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: pm888@mail.ru

**Орлова Екатерина Сергеевна**,  
магистрант, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: pm888@mail.ru

## **СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КПД ТРУБЧАТОЙ ПЕЧИ ДЛЯ НАГРЕВА ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА**

**Chernigovskaya M.A., Orlova E.S.**

## **METHODS FOR INCREASING THE TUBE FURNACE EFFICIENCY FOR HYDROGEN-CONTAINING GAS HEATING**

**Аннотация.** В работе рассмотрены способы повышения КПД узла нагрева водородсодержащего газа для процесса гидродеалкилирования. Также предложены пути повышения энергоэффективности действующей печи.

**Ключевые слова:** энергосбережение, трубчатые печи, теплопередача.

**Abstract.** Methods for increasing the efficiency of a hydrogen-containing gas heating unit for the hydrodealkylation process were discussed in this paper. Ways to increase the energy efficiency of an existing furnace are also proposed.

**Keywords:** energy saving, tube furnaces, heat transfer.

Трубчатые печи широко применяются в химической промышленности для нагрева рабочих сред, а также для проведения различных химических процессов. Они применяются для тех процессов, где необходимы высокие температуры – от 300 до 1500 °С [1].

Производство бензола методом гидродеалкилирования БТК-фракции пиролиза относится к высокотемпературным процессам. Реакции деструктивного гидрирования с отщеплением алкильных групп от ароматических соединений протекают при 500-650 °С.

Технологическая схема реакционного узла процесса гидродеалкилирования представлена на рис. 1. Процесс реализуется следующим образом. БТК-фракция, очищенная от более легких ( $C_5$  и ниже) и более тяжелых ( $C_9$  и выше) соединений, поступает в испарительную колонну К-103, которая представляет собой аппарат смешения. В качестве горячего теплоносителя используется циркулирующий водородсодержащий газ (ВСГ). Поступая на установку, он разделяется на два потока. Первый поток направляется непосредственно в печь П-101, а второй – в обход печи. Выходящий из печи ВСГ, нагретый до температуры 480-560 °С, делится на две части, первая из которых подается в нижнюю часть испарительной колонны К-103, а вторая смешивается с потоком холодного водорода для коррекции температуры и направляется в верхнюю часть испарительной колонны К-103, называемую перегревателем, где смешивается с БТК-фракцией, образуя газосырьевую смесь (ГСС) [2].

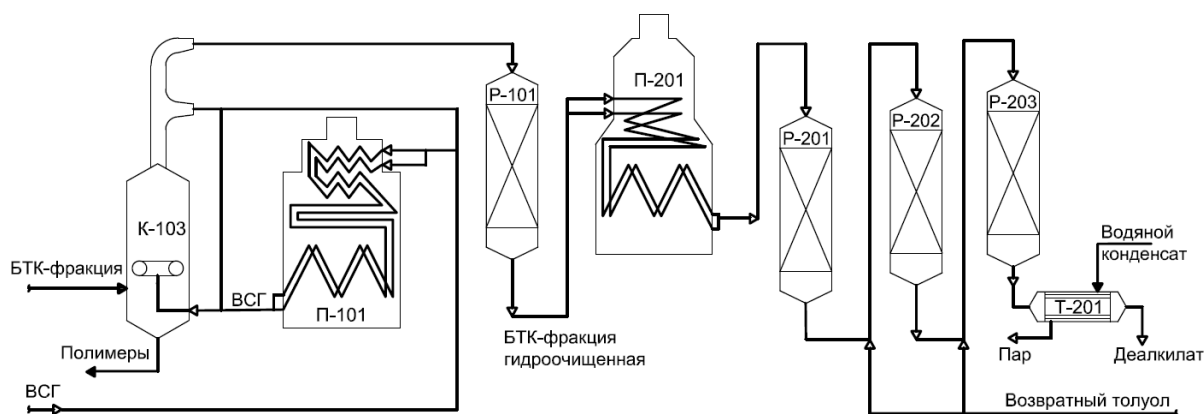


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема реакционного узла процесса гидродеалкилирования: К-103 – испарительная колонна; П-101 – печь нагрева ВСГ; Р-101 – реактор предварительной гидроочистки; П-201 – печь нагрева ГСС; Р-201-203 – реакторы гидродеалкилирования; Т-201 – теплообменник

Далее полученная ГСС направляется в реактор предварительной гидроочистки Р-101, где происходит ее очистка от непредельных углеводородов (олефинов, диенов) и гидрогенолиз сернистых соединений.

Очищенная ГСС затем нагревается в печи П-201 до температуры реакции (580-610 °С). После этого она направляется в три последовательных реактора гидродеалкилирования Р-201-203, где происходит превращение алкилароматических углеводородов (в основном, толуола и ксилолов) в бензол. Для увеличения выхода бензола, а также для снятия тепла реакции перед реакторами Р-202 и Р-203 в реакционную смесь предусмотрена подача возвратного толуола.

Выходящая из реактора Р-203 газо-продуктовая смесь, называемая деалкилатом, поступает в котел-утилизатор Т-201 и далее направляется на узел выделения бензола.

Большой интерес для изучения в этом процессе представляет печь нагрева ВСГ П-101. Она относится к типу ЦС – это вертикальная цилиндрическая печь прямого пламени, т.е. с открытым факелом [3]. Особенность данной печи – в колебаниях нагрузки по сырью.

Как правило, работа печи в таких условиях негативно сказывается на ее эффективности вследствие нестационарности технологического режима. Поэтому целью исследования была оценка эффективности работы действующей печи.

В рамках исследования для данной печи были выполнены следующие расчеты [4]:

1. Расчет процесса горения топлива;
2. Определение КПД печи в целом и отдельных ее зон;

3. Расчет камеры радиации;
4. Расчет камеры конвекции.

Полученные результаты расчета далее сравнивались с проектными данными (таблица 1).

Таблица 1

Сравнение расчетных и проектных показателей работы печи П-101

Параметр	Значение	
	Проектное	Расчетное
Расход ВСГ, т/ч	4-5	3,5-4
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	49023	55488
Максимальная тепловая нагрузка, ГДж/ч	29,12	13,76
КПД печи, %	84	67,7-71,3
Потери в окружающую среду, %	2,76	13,8-25,2
Теплонапряженность радиантных труб, кВт/м <sup>2</sup>	20-25	23,2
Суммарный коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к трубам змеевика конвекции, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	10-40	~11

В ходе исследования было выявлено следующее. Для рассмотренной печи в настоящее время в качестве топлива используется газ с большей теплотворной способностью, чем это предусмотрено проектом. Следовательно, имеет место повышение максимальной температуры горения, что приводит к повышению теплонапряженности радиантных труб.

Действующая нагрузка печи по сырью – ниже проектной, однако при этом теплонапряженность радиантных труб печи близка по значению к верхней границе, допустимой для данного типа печей. Это означает, что при дальнейшем повышении нагрузки по сырью может возникнуть локальный перегрев одной или нескольких радиантных труб, приводящий впоследствии к их прогару.

Процесс теплопередачи в камере конвекции характеризуется низкими значениями коэффициента теплоотдачи со стороны дымовых газов, что свидетельствует о низкой эффективности работы конвективной секции печи.

Рассчитанное значение общего КПД печи также ниже проектного, а кроме того, имеет место наличие потерь тепла порядка 20 %, которые не относятся к потерям в окружающую среду или потерям с дымовыми газами.

На основании этого можно сделать вывод, что низкая эффективность теплопередачи может быть связана с проблемами в линии топлива. В качестве причин нами были выбраны:

1. Неполнота сгорания топлива вследствие несовершенства системы подачи воздуха, а также применения неэффективных горелок открытого пламени;
2. Малая поверхность теплопередачи в радиантной зоне печи, что приводит к высоким значениям теплонапряженности;
3. Проблемы в работе шиберной задвижки, что приводит к снижению тяги и уменьшению скорости движения дымовых газов в камере конвекции.

Для решения выявленных проблем нами были предложены следующие варианты для повышения КПД действующей печи.

Для повышения эффективности сжигания топлива предлагается установить автоматическую систему контроля подачи воздуха, а также датчики контроля остаточного кислорода в образующихся дымовых газах.

Для улучшения процесса теплоотдачи со стороны дымовых газов в конвективной секции предлагается установить систему автоматического регулирования для шиберной заслонки, расположенной на выходе дымовых газов из камеры конвекции. Это позволит создать тягу, а, следовательно, и необходимую скорость потока дымовых газов, повышая, таким образом, коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке трубы, а также суммарный коэффициент теплопередачи в зоне конвекции.

Для снижения теплонапряженности радиантных труб печи предложено установить второй ряд змеевика, состоящий из 36 труб по 18 труб на один поток. Трубы устанавливаются в шахматном порядке по отношению к первому ряду труб змеевика по окружности диаметром 2,63 м. Это приведет к снижению теплонапряженности радиантных труб до 11,9 Вт/м<sup>2</sup>, что позволит варьировать тепловую нагрузку печи без риска разрушения змеевика.

Однако, уменьшение диаметра печи по осям труб змеевика может привести к тому, что трубы окажутся слишком близко расположены к пламени факела. В связи с этим возможно повышение температуры наружной поверхности труб, которое может также негативно сказаться не только на эффективности работы печи, но и на безопасности ее работы.

Поэтому можно сделать вывод о необходимости комплексного решения данной проблемы. Безопасность и высокую эффективность работы действующей печи нагрева ВСГ можно обеспечить путем одновременного внедрения вышеперечисленных мероприятий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ентус, Н.Р.** Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Н. Р. Ентус, В. В. Шарихин. – М.: Химия, 1987. – 304 с.
2. **Орлова, Е.С.** Анализ работы печи для нагрева водородсодержащего газа / Е. С. Орлова, М. А. Черниговская // Вестник Ангарского государственного технического университета, 2023. – № 17. – С. 91-94.
3. **Адельсон, С.В.** Технологический расчет и конструктивное оформление нефтегазовых печей. М.: Гостоптехиздат, 1952. – 240 с.
4. **Кузнецов, А.А.** Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. Изд. 2-е, пер. и доп. / А. А. Кузнецов, С. М. Кагерманов, Е. Н. Судаков – Л.: Химия, 1974 – 344 с.