

УДК 66.045.1

Щербин Сергей Анатольевич,

к.т.н., доцент, декан факультета технической кибернетики,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Родионов Григорий Андреевич,

обучающийся гр. ХТм-23-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

О ПРОБЛЕМЕ КОНДЕНСАЦИИ ДЕАЛКИЛАТА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ БЕНЗОЛА
КАТАЛИТИЧЕСКИМ ГИДРОДЕАЛКИЛИРОВАНИЕМ НА УСТАНОВКЕ «ПИРОТОЛ»

Shcherbin S.A., Rodionov G.A.

ON THE PROBLEM OF CONDENSATION OF DEALKYLATE
IN THE PRODUCTION OF BENZENE BY CATALYTIC HYDRODEALKYLATION
AT THE PYROTOL PLANT

Аннотация. В статье рассмотрены промышленные каталитические процессы получения бензола гидродеалкилированием. Приведены некоторые технико-экономические показатели этих процессов, сформулированы задачи по совершенствованию каталитических процессов получения высокочистого бензола. Предложены варианты решения сезонной проблемы, связанной с конденсацией и охлаждением деалкилата в аппарате воздушного охлаждения на установке «Пиротол» Ангарского завода полимеров.

Ключевые слова: пиротол, бензол, деалкилат, аппарат воздушного охлаждения.

Abstract. The article discusses industrial catalytic processes for the production of benzene by hydrodealkylation. Some technical and economic indicators of these processes are given, and tasks for improving the catalytic processes for producing high-purity benzene are formulated. The options for solving the seasonal problem associated with the cooling and condensation of the dealkylate in the air cooling unit at the Pyrotol installation of the Angarsk Polymer Plant are considered.

Keywords: pyrotol, benzene, dealkylate, air cooling unit.

Важной продукцией органического синтеза с мировым потреблением, составляющим десятки миллионов тонн в год, является бензол, получаемый из продуктов глубокой переработки нефти, угля и газа. При существенных абсолютных объемах производства коксохимического бензола и значительных потенциальных возможностях получения его из продуктов переработки природного газа, основным источником сырья для производства бензола в настоящее время являются нефтяные углеводородные фракции.

Для получения высокочистого товарного бензола в современной нефтехимической промышленности используются каталитический риформинг и пиролиз бензиновых фракций нефти с последующей каталитической гидрообработкой и ректификацией гидрогенизата, а также деалкилирование и/или диспропорционирование алкилароматических углеводородов [1]. Разработано несколько промышленных способов получения бензола методом деалкилирования: термическое гидродеалкилирование, каталитическое гидродеалкилирование и деалки-

лирование в присутствии окислительных агентов (H_2O , CO_2 и др.).

Получение бензола методом каталитического гидродеалкилирования имеет преимущества по сравнению с термическим методом по энергозатратам и расходу водорода на производство 1 т продукции, по селективности образования бензола, по требованиям к сырью – допускается небольшое содержание в нем непредельных (до 5%) и сернистых соединений (до 0,01%). Кроме того, каталитический процесс позволяет получать примерно на 2,5% больше бензола при меньших затратах, а получаемый бензол содержит в 2-3 раза меньше тиофена по сравнению с бензолом термического процесса [2].

Одной из задач по совершенствованию каталитических процессов получения высокочистого бензола является расширение сырьевой базы для процессов гидродеалкилирования. В частности, использование в качестве сырья, помимо наиболее предпочтительного толуола и традиционных бензол-толуол-ксилольных фракций, более тяжелых

C₉- и C₁₀-фракций ароматических углеводородов.

Как правило, каталитические процессы гидродеалкилирования толуола и (или) смесей алкилароматических углеводородов осуществляют в присутствии алюмохромовых или алюмокобальтмолибденовых катализаторов при температурах 565-650 °С (на 100-200 °С ниже чем в термическом способе), давлении 3-6 МПа и мольном разбавлении углеводородного сырья водородом в соотношении 1:3÷8).

В настоящее время в промышленном масштабе каталитические технологии реализованы процессами "Хайдил" (фирма UOP, США), "Детол" и "Пиротол" (фирма "Houdry", США) и некоторыми другими.

В процессе "Хайдил" для снижения расхода водорода применяется либо чистый толуол, либо высокоароматизированное (70-95%) сырье нефтяного и (или) каменноугольного происхождения. При получении бензола из чистого толуола расход сырья на одну установку составляет 160 м³/сутки, расход 90%-го водорода – 61 тыс. м³/сутки; при этом выход бензола составляет 128 м³/сутки, а высококалорийного газа с теплотворной способностью 8900 ккал/м³ – 50 тыс. м³/сутки.

Для получения бензола в процессе "Детол" используют чистый толуол или сырье, содержащее 3,2% неароматических углеводородов, 47,3% толуола, 49,5% ароматических соединений состава C₈; при этом выход ароматических углеводородов составляет 99 мол.%, а в продукте содержится 75,7% бензола. Получаемый бензол имеет чистоту 99,95 мол.% и содержит 0,00002% тиафена.

Для улучшения технико-экономических показателей на современных установках гидродеалкилирования часто совмещают несколько операций каталитической гидрообработки сырья в одном аппарате. Так, в процессе каталитической переработки продуктов пиролиза бензина "Пиротол" в одном реакторе в присутствии алюмохромового катализатора протекают гидродеалкилирование алкилбензолов, гидрообессеривание серосодержащих и гидрокрекинг неароматических соединений. Товарный бензол выделяется ректификацией и содержит 99,92 % основного продукта, менее 0,7·10⁻⁴ % тиафена и имеет температуру кристаллизации 5,5 °С и выше.

В таблице 1 представлены некоторые технико-экономические показатели описанных каталитических процессов гидродеалкилирования алкилароматических углеводородов [2].

Установка "Пиротол" Ангарского завода полимеров включает следующие основные производственные стадии: узел предварительного фракционирования пироконденсата; узел гидродеалкилирования; узел выделения бензола; узел компримирования; узел очистки водорода [3].

Узел гидродеалкилирования предназначен для испарения бензол-толуол-ксилольной фракции в испарителе, гидрирования олефинов и диенов в реакторе предварительной гидрообработки, а также для проведения каталитического гидродеалкилирования углеводородов фракции C₆-C₈ и очистки от сернистых соединений.

На предприятии существует сезонная проблема, связанная с конденсацией и последующим охлаждением в аппарате воздушного охлаждения деалкилата – контактного газа, выходящего из реактора гидродеалкилирования ароматических углеводородов, представляющего собой парогазовую смесь углеводородов и циркулирующего водородсодержащего газа. Состав смеси и физико-химические свойства компонентов в зоне охлаждения при средней температуре 108 °С представлены в таблице 2.

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) широко используются для конденсации и последующего охлаждения высокотемпературных технологических сред в химической и нефтехимической промышленности, особенно на пожаро- и взрывоопасных предприятиях [4].

В АВО часть углеводородных компонентов смеси (C₅H₁₂, C₆H₆, C₇H₈, C₁₂H₁₀ и C₁₀H₈) конденсируются и далее газожидкостная смесь охлаждается.

В качестве холодного теплоносителя в АВО используется атмосферный воздух, поэтому эффективность их эксплуатации зависит от времени года – в летний период движущая сила процесса теплообмена существенно уменьшается и конденсатор не справляется со своей задачей. Для повышения коэффициента теплоотдачи атмосферного воздуха в наиболее напряженный летний период возможно его увлажнение с помощью разбрызгивателя.

Таблица 1 – Технико-экономические показатели способов получения бензола

Показатели	Процессы гидродеалкилирования		
	“Hydeal”	“Detol”	“Pyrotol”
Используемое сырье	Толуол	Толуол	Бензин пиролиза
Расход сырья, т/1 т C ₆ H ₆	1,23	1,23	1,60
Расход H ₂ , м ³ /1 т C ₆ H ₆ :			
90%-го	3103	–	–
82%-го	–	1040	–
85%-го	–	–	1251
Выход товарного бензола на пропущенное сырье, масс. %	81,10	82,05	68,04
Содержание бензола в товарном продукте, масс. %	99,94	99,94	99,92
Относительная стоимость переработки сырья (на 1 т бензола)	1,07	1,00	1,29
Относительные удельные капитальные вложения (на 1 т бензола)	1,15	1,00	1,01

Таблица 2 – Состав и физико-химические свойства компонентов смеси

Обозначение	Массовая доля	Молярная масса, кг/кмоль	Плотность, кг/м ³	Динамическая вязкость, мПа·с	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Удельная массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)
Деалкилат						
H ₂	0,0003	2	0,064	0,018	0,018	14826
CO ₂	0,0001	44	1,407	0,030	0,028	1278
CH ₄	0,0052	16	0,512	0,014	0,044	1483
C ₂ H ₆	0,0157	34	1,088	0,030	0,039	1900
C ₃ H ₈	0,0081	44	1,407	0,014	0,034	1916
C ₄ H ₁₀	0,0002	58	1,855	0,013	0,036	1936
C ₅ H ₁₂	0,0025	72	445,0	0,093	0,037	1946
C ₆ H ₆	0,7753	78	586,6	0,092	0,039	1964
C ₇ H ₈	0,1634	92	728,2	0,092	0,040	1980
C ₁₂ H ₁₀	0,0269	154	788,9	0,095	0,042	1580
C ₁₀ H ₈	0,0022	152	930,5	0,099	0,045	2038
Циркулирующий водородсодержащий газ						
H ₂	0,6978	2	0,064	0,018	0,0176	14826
CO	0,0001	28	0,896	0,0342	1,925	1162
H ₂ S	0,0014	34	1,088	0,0162	0,03971	1348
CO ₂	0,0003	44	1,407	0,0342	0,0275	1278
CH ₄	0,2129	16	0,512	0,014	0,044	1483
C ₂ H ₆	0,0663	34	1,088	0,030	0,0385	1900
C ₃ H ₈	0,0083	44	1,407	0,014	0,0341	1916
C ₄ H ₁₀	0,0001	58	1,855	0,013	0,0363	1936
C ₅ H ₁₂	0,0002	72	2,303	0,093	0,0374	1946
C ₆ H ₆	0,0085	78	2,495	0,092	0,0385	1964
C ₇ H ₈	0,0006	92	2,943	0,092	0,0396	1980
N ₂	0,0036	28	0,896	0,0162	0,0264	929

Температура деалкилата после системы охлаждения должна составлять 49-50 °С, но в летний период конечная температура деалкилата на выходе из АВО может достигать 90 °С (рисунок 1), что не соответствует производственным нормам и приводит к увели-

чению потерь бензола в ходе дальнейшего разделения.

Для решения озвученной проблемы требуется реконструкция системы конденсации и охлаждения деалкилата. Наибольший практический интерес представляют два ва-

рианта реконструкции – добавление дополнительной теплообменной секции в АВО для увеличения площади поверхности теплообмена, либо использование в летний период времени дополнительного кожухотрубчатого теплообменника совместно с имеющимся АВО.

Особенности теплового и гидравлического расчетов процессов конденсации и охлаждения двухфазного парожидкостного потока деалкилата обусловлены его многокомпонентным составом и двухфазным агрегатным состоянием. Теплофизические свойства такой системы рассчитываются как аддитивные величины из соответствующих свойств компонентов с учетом их массового содержания (таблица 2).

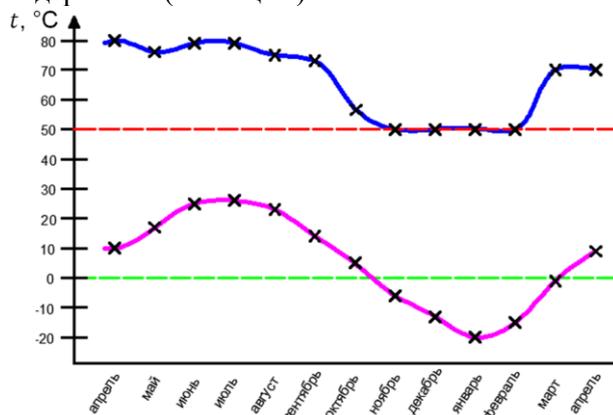


Рисунок 1 – График максимальных среднемесячных температур деалкилата после охлаждения в АВО (t_1) и атмосферного воздуха (t_2)

Сложность описания и расчета двухфазных газожидкостных потоков заключается также в деформируемости границы раздела фаз и сжимаемости одной из фаз. Если к тому же происходит конденсация пара, то количественное соотношение фаз непрерывно меняется вдоль поверхности теплообмена. При движении двухфазного парожидкостного потока в трубах возможно существование различных гидродинамических режимов течения.

В работах [5-7] рассматриваются подходы к определению капитальных и эксплуатационных затрат на теплообменные аппараты. Получены выражения, позволяющие оценить затраты на теплообменники с учетом расходов и свойств теплоносителей, а также конструктивных характеристик аппаратов.

Эксплуатационные затраты на трубчатый теплообменник обусловлены в первую очередь стоимостью электроэнергии на перемещение теплоносителей [6], а капитальные затраты в основном определяются стоимостью труб [7], которая, в свою очередь, зависит от площади поверхности теплообмена, обеспечивающей требуемую мощность теплового потока.

Очевидно, что первый вариант реконструкции потребует больших капитальных затрат, поскольку аппараты воздушного охлаждения отличаются сравнительно высокой стоимостью, обусловленной использованием теплообменных пучков из оребренных алюминиевых или биметаллических труб.

При этом эксплуатационные расходы на АВО меньше благодаря исключению затрат на подготовку и перекачку воды, малому энергопотреблению в зимний период (при низкой температуре атмосферного воздуха вентиляторы отключают), снижению трудоемкости и стоимости ремонтных работ (не требуется очистка наружной поверхности труб) и др.

Другим важным преимуществом АВО является их сравнительная пожаробезопасность, поскольку существенная доля теплоты (до 30 %) в этих теплообменниках отводится посредством естественной конвекции атмосферного воздуха, что является важным фактором при аварийных ситуациях [4].

По результатам расчетов наиболее выгодным для предприятия мероприятием оказался второй вариант реконструкции, заключающийся в установке дополнительного кожухотрубчатого теплообменника, работающего только в летний период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров, И. Я. Получение бензола гидродеалкилированием алкилароматических углеводородов: перспективы развития процессов термического гидродеалкилирования / И. Я. Петров, А. Г. Бяков, Б. Г. Трясунов // Вестник КузГТУ. – 2005. – № 1 (45). –

С. 59-65.

2. Петров, И. Я. Получение бензола гидродеалкилированием алкилароматических углеводородов: промышленные каталитические процессы и эффективные катализаторы / И. Я. Петров, А. Г. Бяков, В. Н. Доп-

шак, Б. Г. Трясунов // Вестник КузГТУ. – 2005. – № 2 (46). – С. 120-129.

3. Щербин, С. А. Реконструкция узла конденсации и охлаждения деалкилата установки производства бензола «Пиротол» / С. А. Щербин, Г. А. Родионов // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2024. – № 21. – С. 176-180.

4. Щербин, С. А. Оптимальный коэффициент обребрения трубного пучка воздушного конденсатора паров бензина / С. А. Щербин, И. А. Никитина. // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2019. – № 16. – С. 157-161.

5. Кузьмин, С. И. Комплексная оптимизация трубчатого теплообменника / С. И. Кузьмин, С. А. Щербин // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2018. – № 15. – С. 21-27.

6. Щербин, С. А. Определение эксплуатационных затрат на кожухотрубчатый теплообменник / С. А. Щербин, А. А. Глотов // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2020. – № 17. – С. 140-144.

7. Щербин, С. А. Определение капитальных затрат на кожухотрубчатый теплообменник / С. А. Щербин, А. А. Глотов // Сборник научных трудов АнГТУ. – 2020. – № 17. – С. 136-139.

УДК 621.039.534

Щербин Сергей Анатольевич,

к.т.н., доцент, декан факультета технической кибернетики,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Синьков Дмитрий Александрович,

обучающийся гр. ТМмз-23-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В ТЕПЛООБМЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

Shcherbin S.A., Sinkov D.A.

THE USE OF HIGH-TEMPERATURE HEAT TRANSFER FLUID IN HEAT EXCHANGE EQUIPMENT

Аннотация. В статье рассмотрены основные свойства и особенности применения высокотемпературных теплоносителей для обогрева производственных аппаратов. Приведена классификация теплоносителей, перечислены важнейшие требования к ним.

Ключевые слова: высокотемпературные теплоносители, теплообмен.

Abstract. The article discusses the main properties and features of the use of high-temperature heat carriers for heating industrial apparatus. The classification of heat carriers is given, the most important requirements for them are listed.

Keywords: high-temperature heat carriers, heat exchange.

Значительная доля технологических процессов нефтехимической промышленности протекает при высоких температурах. Интенсивность технологического процесса, а также качество выпускаемого продукта часто зависят от точности поддержания температуры на отдельных стадиях процесса.

При проектировании новых и реконструкции существующих высокотемпературных производств возникает вопрос о способах достижения заданных температур. Наиболее часто для этого применяются обогрев дымовыми газами, насыщенным водяным паром, водой высокого давления и электричеством.

Вместо перечисленных выше обще-

принятых методов обогрева на некоторых современных предприятиях для интенсификации производства и выполнения требований к поддержанию постоянной температуры технологического процесса используется обогрев с помощью высокотемпературных теплоносителей (ВТ) – промежуточных теплоносителей, которые имеют высокую температуру нагрева при сравнительно низком давлении [1].

О возможности применения ВТ для обогрева производственных аппаратов известно давно, однако широкого распространения этот, обладающий целым рядом преимуществ способ обогрева, не получил.

В соответствии с принципом термоди-