МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПИРОЛИЗА

СИНТЕЗ ФЕНОЛА

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТЫ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

ДЕЛОВОЙ ЖУРНАЛ

Neftegaz.RU

ISSN 2410-3837

ИНТЕРЕСНО О СЕРЬЕЗНОМ

5 [137] 2023

НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА: СЛОЖНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ

Входит в перечень ВАК (К1)

СЕЛЕКТУМ
ИННОВАЦИОННЫЕ
КАТАЛИЗАТОРЫ

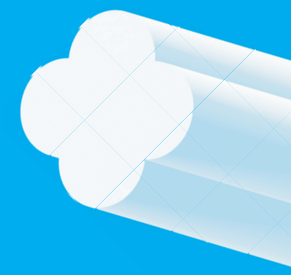
Neftegaz.RU

СПЕЦПРОЕКТ

Наши катализаторы

как «Газпром нефть» строит новую высокотехнологичную индустрию

Новое поколение катализаторов — это интересно! О технологиях, испытаниях и создании в России высокотехнологичной отрасли читайте в новом совместном спецпроекте Neftegaz.RU и компании «Газпром нефть».



SELECTUM.NEFTEGAZ.RU

Нестационарная математическая модель пиролиза бензиновой фракции

14

Нефтехимия Ирана под прессингом западных санкций

30

СОДЕРЖАНИЕ

Гидропероксидный способ синтеза фенола и его алкильных производных совместно с кетонами алифатического и алициклического ряда

34

Математическое моделирование для прогнозирования работы катализаторов риформинга на установке со стационарным слоем

40

Эпохи НГК 4

РОССИЯ *Главное*

НПЗ: переработка отрасли 6

Приоритеты технологического суверенитета 8

События 10

Первой строчкой 12

ПЕРЕРАБОТКА

Нестационарная математическая модель пиролиза бензиновой фракции 14

Инновационные способы разделения водонефтяных эмульсий и переработки нефтешламов 24

ПЕРЕРАБОТКА

Нефтехимия Ирана под прессингом западных санкций 30

Гидропероксидный способ синтеза фенола и его алкильных производных совместно с кетонами алифатического и алициклического ряда 34

Математическое моделирование для прогнозирования работы катализаторов риформинга на установке со стационарным слоем 40

Оценка возможности использования метилакрилата в качестве одоранта на ГПЗ 52

Хронограф 55

НЕФТЕСЕРВИС

Глобальный рост или локальная подстройка? Какие пути выбирают российские нефтесервисные компании в новых условиях 56

Венгрия как ведущий партнер торговли энергоресурсами России в Европе

66

Нефтехимические исследования при разработке сланцевых формаций

70

Твердое биотопливо и низкоуглеродная экономика в России и мире

82

Вода из воздуха: снижение дефицита воды на нефтегазовых месторождениях

90

БУРЕНИЕ

Элементы питания для бурения в экстремальных условиях 60

Календарь событий 63

ЭКОНОМИКА

Пять шагов, чтобы дать цепочкам поставок из Китая конкурентное преимущество 64

Венгрия как ведущий партнер торговли энергоресурсами России в Европе 66

ПРИКЛАДНАЯ НАУКА

Нефтехимические исследования при разработке сланцевых формаций 70

Россия в заголовках 81

АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Твердое биотопливо и низкоуглеродная экономика в России и мире 82

Вода из воздуха: снижение дефицита воды на нефтегазовых месторождениях 90

ВЫСТАВКИ И КОНФЕРЕНЦИИ

Нефтегаз-2023 96

Новые участники и новые перспективы на выставке Нефтегаз-2023 100

Новости науки 102

Нефтегаз life 104

Классификатор 106

Цитаты 112

ЭПОХИ НГК

212 лет назад

В 1811 году чиновник Министерства коммерции П. Соболевский создал первую установку для получения искусственного газа.

186 лет назад

В 1837 году Н. Воскобойников, директор Бакинских и Ширванских нефтяных промыслов, открывает вблизи месторождений опытный завод по перегонке легкой сураханской и тяжелой балаханской нефти.

170 лет назад

В 1853 году жестянщик А. Братковский создает первый безопасный тип керосиновой лампы, что спровоцировало рост спроса на керосин и сподвигло химиков совершенствовать технологии его производства из разных нефтяных фракций, разрабатывая новые способы очистки.

156 лет назад

В 1867 году на Таманском полуострове полковник А. Новосильцев открывает нефтеперегонный завод, где впервые в России нефть перегоняется под перегретым паром.

145 лет назад

В 1878 году предприниматель и изобретатель В. Рагозин строит в Балахне масляный завод и организует первое в России нефтехимическое производство, где внедряет собственную разработку – технологию получения смазочных масел из мазута с помощью перегретого пара.

139 лет назад

В 1884 году руководитель «Товарищества нефтяного производства братьев Нобель» Л. Нобель подал в департамент торговли и мануфактур заявку на «Куб усовершенствованной системы для дробной и непрерывной перегонки нефти».

111 лет назад

В 1912 году горный инженер С. Квитка получает патент на «Способ добывания бензина и иных продуктов из нефти, нефтяных остатков и пр.», т.о. впервые было предложено аппаратное решение для технологии жидкофазного термического крекинга.

105 лет назад

В 1918 году академик Н.Д. Зелинский впервые осуществляет процесс низкотемпературного (около 200 °С) каталитического крекинга нефти с безводным хлористым алюминием в качестве катализатора.

94 года назад

В 1929 году пущена в эксплуатацию первая очередь Туапсинского НПЗ.

Neftegaz.RU

Издательство Neftegaz.RU

РЕДАКЦИЯ

Главный редактор
Ольга Бахтина

Шеф-редактор
Анна Павлихина

Редактор
Анастасия Никитина

Аналитики
Анатолий Чижевский
Дарья Беляева

Журналисты
Анна Игнатьева
Елена Алифирова
Анастасия Гончаренко
Анастасия Хасанова
Анна Шевченко

Дизайн и верстка
Елена Валетова

Корректор
Виктор Блохин

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ампилов Юрий Петрович
д.т.н., профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова

Алюнов Александр Николаевич
к.т.н., ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»

Бажин Владимир Юрьевич
д.т.н., эксперт РАН, Санкт-Петербургский горный университет

Гриценко Александр Иванович
д.т.н., профессор, академик РАЕН

Гусев Юрий Павлович
к.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО НИУ МЭИ

Данилов-Данильян Виктор Иванович
д.э.н., профессор, член-корреспондент РАН, Институт водных проблем РАН

Двойников Михаил Владимирович
д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский горный университет

Еремин Николай Александрович
д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

Илюхин Андрей Владимирович
д.т.н., профессор, Советник РААСН, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

Каневская Регина Дмитриевна
действительный член РАЕН, д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина

Макаров Алексей Александрович
д.э.н., профессор, академик РАН, Институт энергетических исследований РАН

Мастепанов Алексей Михайлович
д.э.н., профессор, академик РАЕН, Институт энергетической стратегии

Панкратов Дмитрий Леонидович
д.т.н., профессор, Набережночелнинский институт

Половинкин Валерий Николаевич
научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр», д.т.н., профессор, эксперт РАН

Салыгин Валерий Иванович
д.т.н., член-корреспондент РАН, профессор МИЭП МГИМО МИД РФ

Третьяк Александр Яковлевич
д.т.н, профессор, Южно-Российский государственный политехнический университет

Neftegaz.RU

Издательство:
ООО Информационное агентство Neftegaz.RU

Директор
Ольга Бахтина

Отдел рекламы
Дмитрий Аверьянов
Валентина Горбунова
Анна Егорова
Марина Шевченко
Галина Зуева
Виктория Мыларщикова
Евгений Короленко

account@neftegaz.ru
Тел.: +7 (495) 778-41-01

Служба технической поддержки
Сергей Прибыткин
Алексей Лозгачев

Выставки, конференции, распространение
Мария Короткова

Отдел по работе с клиентами
Екатерина Данильчук

Деловой журнал Neftegaz.RU зарегистрирован федеральной службой по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия в 2007 году, свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-46285

Адрес редакции:
123001, г. Москва,
Благовещенский пер., д. 3, с.1
Тел.: +7 (495) 778-41-01
www.neftegaz.ru
e-mail: info@neftegaz.ru

Подписной индекс Урал Пресс 013265

Перепечатка материалов журнала Neftegaz.RU невозможна без письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за достоверность информации, опубликованной в рекламных объявлениях, а также за политические, технологические, экономические и правовые прогнозы, предоставленные аналитиками. Ответственность за инвестиционные решения, принятые после прочтения журнала, несет инвестор.

Отпечатано в типографии «МЕДИАКОЛОР»

Заявленный тираж 8000 экземпляров

9 772410 383004

499 502 10 10 \ Dosflota10.ru

Реклама. Срок проведения акции с 28.11 по 31.12.2022. Подробности на сайте dosflota10.ru

GALAXY GROUP

Застройщик:
АО Специализированный Застройщик «Капитал-Инвест»

ДОМ РФ | ФИНАНСИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА
АО «Банк ДОМ.РФ»

РОССИЯ
Главное

На 52 %
снизились нефтегазовые доходы

В 2 раза
снизят выплаты по топливному демпферу

3,4 трлн
рублей недополучил бюджет в первом квартале 2023 года

До 2028 г.
предлагают продлить программу модернизации НПЗ

НПЗ: ПЕРЕРАБОТКА ОТРАСЛИ

Анна Павлихина

Бюджет РФ в 1-м квартале недополучил 3,4 трлн рублей, в том числе на 52 % снизились нефтегазовые доходы по сравнению с аналогичным периодом 2022 года. Теперь, чтобы соблюсти закон о бюджете, в оставшиеся до конца года месяцы бюджет должен быть профицитным. Учитывая ситуацию, это невозможно. А значит, будут искать любые дополнительные способы пополнения казны.

Один из таких способов Минфин видит в изменении механизмов топливного демпфера. Изначально смысл его введения был в уравнивании доходности при продаже продуктов нефтепереработки на внутренний и внешний, преимущественно европейский, рынок. Теперь, когда европейского рынка нет, получается, что и дотировать перерабатывающие предприятия смысла тоже нет. А. Силуанов посчитал, что сейчас НПЗ получают маржу в размере 8 тыс. рублей за тонну, тогда как раньше эта цифра составляла 2 тыс. рублей за тонну. Не желая выплачивать нефтяникам маржу из бюджета, Минфин предложил с июля 2023 года по июль 2024 года урезать выплаты вдвое. Снижение демпфера на 30 млрд руб. в месяц «даст экономию по нефтегазовым доходам и снизит недопоступление этих доходов в бюджет», – заявил А. Силуанов накануне первомайских праздников. А уже 2 мая на столичных АЗС стоимость бензина резко возросла. Нововведение, которому еще только предстоит заработать, сразу дало результат. Нет сомнений, что контролирующие органы предпримут соответствующие меры. Но летом, во время посевных работ и дачного сезона спрос на бензин вырастет, что, как правило, ведет к повышению стоимости топлива, а также создает хорошие условия для незаметного отыгрывания снизившегося демпфера.

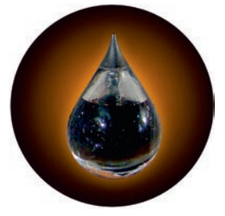
Но цель наших рассуждений, конечно, не честность нефтяных компаний, ведь, как известно, переработка нефти – дело прибыльное, будь маржа хоть восемь тысяч с тонны, хоть две. Вопрос в том, как без дополнительных доходов (под которыми традиционно понимается прибыль плюс) развивать производство. В данном случае те производства, на которые возлагаются особые надежды.

Российские нефтеперерабатывающие заводы производят в два раза больше продукции, чем нужно внутреннему рынку. Еще недавно эти, не сказать излишки, экспортировались в Европу, США и азиатские страны. Так, в 2021 г. из произведенных 144 млн тонн Европа получила 88 млн тонн, в Штаты отправили 6 млн тонн. Также 20 млн тонн закупили азиатские страны. Не слишком много, учитывая, что на АТР возлагаются все экспортные надежды. Вероятность того, что экспорт нефтепродуктов в Китай и Индию можно будет увеличить, снизив цену, очень невелика, эти страны и сами вполне успешно справляются с производством бензина и дизельного топлива.

На фоне безрадостных перспектив в отношении экспорта и малоприятного снижения маржи в условиях сокращения выплат по демпферу хочется верить, что нефтепереработка не сдаст позиции. Речь не только о сокращении объемов производства, но, в первую очередь, о поддержании современного технологического уровня производств. Санкционные ограничения коснулись как технологий и оборудования, так и необходимых для нефтепереработки катализаторов. Модернизация НПЗ, которая идет уже много лет, все еще не достигла своей цели (хотя нам представляется, что модернизация – это перманентный процесс по внедрению научных инноваций). Учитывая события последних полутора лет Минэнерго предложило продлить программу модернизации перерабатывающих заводов до 2028 г. И, судя по всему, эта программа должна быть насыщена активным внедрением импортозамещающих технологий. Такие технологии есть, но они касаются лишь первичной нефтепереработки, более глубокие переделы все еще сильно зависимы от иностранного оборудования. Такая же картина и с катализаторами. Некоторые крупные компании (Роснефть, Газпром нефть) выпускают определенные марки катализаторов, в частности, для процессов риформинга, изомеризации, гидроочистки, которые они готовы предложить рынку, но по ряду позиций перерабатывающие предприятия стопроцентно зависимы от импорта.

Особым стимулом для развития перерабатывающих производств могло бы стать углубление процессов нефтепереработки. Отраслевые эксперты разделяют это мнение, хотя и считают идею сложнореализуемой. Одни видят спасение в усилении отрасли пластпереработки, другие – в структурной организации текстильной промышленности, третьи говорят о необходимости развивать малотоннажную химию, сырьем для которой также служит продукция, производимая НПЗ.

Крупные компании не добычного профиля уже воплощают в жизнь проекты по производству крупнотоннажных полимеров, каучуков. Но, чтобы эти и подобные проекты получили развитие, необходимо оборудование, технологии, катализаторы собственного производства. А это уже системное планирование, предполагающее взаимодействие ряда министерств, государственные субсидии, инвестиционный климат и недефицитный бюджет. ●



ПРИОРИТЕТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА

Елена Алифирова

Правительство РФ определило приоритетные направления проектов технологического суверенитета и структурной адаптации экономики России. К ним отнесены отрасли, где уровень локализации производства составляет менее 50%. Такие проекты смогут рассчитывать на особый подход банков при одобрении кредитов, пониженную ставку по ним и более активное участие институтов развития. Для развития перспективных отраслей планируют обеспечить до 10 трлн руб. дополнительного финансирования.

Работа будет вестись по тринадцати направлениям: авиационная промышленность, автомобилестроение, железнодорожное машиностроение, медицинская промышленность, нефтегазовое машиностроение, сельскохозяйственное машиностроение, специализированное машиностроение, станкоинструментальная промышленность, судостроение, фармацевтика, химическая промышленность, электроника и энергетика.

Приоритетные направления нефтегазового машиностроения включают технологии для бурения и геологоразведки, производство оборудования для сжиженного природного газа, транспортировки, переработки УВ сырья и оборудование для разработки шельфовых и арктических проектов.

Поддержку также получит производство комплектующих для атомной энергетики. В энергетической промышленности – производство оборудования для, в т.ч. газовых, паровых, гидравлических и ветряных турбин мощностью 35 МВт и более, а также производство кабелей и оборудования. В приоритете – производство систем накопления и хранения электрической энергии, оборудования для водородной энергетики. Среди направлений развития судостроения – производство судов, основных узлов и комплектующих. В химической промышленности определен широкий спектр приоритетных направлений.

Также документ определил приоритеты для проектов структурной адаптации экономики к сегодняшним реалиям, в частности, строительство газотранспортной инфраструктуры с выходом в третьи страны. ●

Рейтинги Neftegaz.RU

Все больше стран стремятся осуществлять расчеты по торговым сделкам в национальных валютах. Денежная единица какой страны способна составить конкуренцию американскому доллару?

Валюта какой страны может стать международной?

26%
Китайский юань, в прошлом году объем сделок в этой валюте составил 7,92 трлн

29%
Российский рубль, страны АТР, Ближнего Востока, Африки и Южной Америки могут рассчитываться за российские энергоресурсы рублями

1%
Японская йена, экономика страны одна из самых развитых и занимает третье место в мире

3%
Кувейтский динар, это самая дорогая валюта в мире

23%
Британский фунт стерлингов, ВВП входит в пятерку мировых, 4 из 10 самых дорогих валют являются денежными единицами стран, находящихся под суверенитетом Великобритании

6%
Швейцарский франк, экономика страны одна из лучших, курс валюты постоянно укрепляется

12%
Интернациональный биткоин, он не подвержен рыночным колебаниям, в эру цифровизации имеет преимущества

Отрасль нефтегазохимии и прежде сталкивалась с трудноразрешимыми задачами технологического, экологического и экономического характера. Каково ее положение сегодня и что ожидать в ближайшем будущем?

Какая основная проблема российской нефтегазохимии мешает отрасли развиваться?

15%
Отказ иностранных лицензиаров и инжиниринговых подрядчиков работать с российскими компаниями

12%
Запрет на экспорт широкого ряда товаров химпрома: метанола, полипропилена, минеральных удобрений

14%
Необходимость поиска новых рынков сбыта

29%
Неблагоприятный инвестиционный климат

19%
Ограничение доступа к европейским технологиям

11%
Недостаточное обеспечение отрасли транспортной инфраструктурой

БАДАЕВСКИЙ
БЕЗОПАСНОСТЬ
ВАШЕГО БУДУЩЕГО ВАШИХ ДЕТЕЙ ВАШИХ ИНВЕСТИЦИЙ
+7 495 236 77 16
BADAEVSKIY.COM
CG CAPITAL GROUP
Реклама. Застройщик АО «СЗ «Бадаевский».
С проектной декларацией можно ознакомиться на сайте badaevsky.com и наш дом.рф

Обвал рынка акций
Выборы президента
Газовые войны
Запуск нового производства
Северный поток
Слияние капиталов
Новый глава Роснефти
Цены на нефть

Первая наземная АЭС малой мощности в России

Корпорация развития Дальнего Востока и Арктики и компания Русатом Оверсиз заключили соглашение о сотрудничестве при строительстве в Якутии, на территории Усть-Янского улуса, первой российской атомной станции малой мощности (АСММ).

Проект будет основан на водо-водяном ядерном реакторе РИТМ-200Н, который является результатом инновационной адаптации технологии малой мощности судового исполнения под наземное размещение. АСММ отличает компактность, модульность и сокращенные темпы сооружения по сравнению с атомными станциями большой мощности. Электрическая мощность станции составит не менее 55 МВт, срок службы незаменяемого оборудования – до 60 лет. Значительная часть безуглеродной электроэнергии будет использована для освоения одного из крупнейших в России золоторудных месторождений Кючус и близлежащих месторождений олова Депутатское и Тирехтях, что позволит создать в регионе мощный промышленный кластер. Ввести в эксплуатацию АСММ планируется в 2028 г.

Антимонопольная служба Турции разрешила Татнефти приобрести турецкую сеть заправочных станций компании Aytemiz Akaryakıt, владеющей более 570 АЗС в 77 провинциях Турции и обслуживающей более 5,5 млн автовладельцев в месяц. Покупка обошлась Татнефти в 320 млн долл.

Бангладеш и Россия рассчитаются юанями

Россия и Бангладеш договорились использовать юани для оплаты кредита на строительство АЭС Руппур. Бангладеш будет проводить платежные расчеты с Россией через любой китайский банк, а российские бенефициары будут получать платежи с использованием китайской трансграничной межбанковской платежной системы.

Россия оказывает кредитную помощь на строительство АЭС Руппур в Бангладеш, проект реализует подрядчик во главе с госкорпорацией Росатом, стоимость оценивается в 12,65 млрд долл. В сентябре 2022 г. бангладешский Центральный банк предоставлял возможность транзакций в юанях, разрешив банкам открывать счета в этой валюте в своих филиалах за границей. 27 марта 2023 г. стало известно, что Уралхиммаш приступил к отгрузке оборудования системы пассивного отвода тепла для АЭС Руппур, а 6 марта 2023 г. на строительной площадке АЭС была завершена установка транспортного шлюза на энергоблоке № 1.

Две новые ВЭС запустят в Ставропольском крае

Запуск двух новых ветряных электростанций на Ставрополье в 2023 г. позволит региону довести их мощность до 760 МВт. Таким образом, суммарная мощность ВЭС увеличится почти на 50%. Об этом сообщил министр энергетики, промышленности и связи края И. Ковалев. Ставропольский край – один из лидеров по темпам развития возобновляемой энергетики, за последние четыре года на территории края реализовано пять подобных проектов в таких округах, как Кочубеевский, Новоалександровский, Ипатовский. Новые станции будут построены в Кочубеевском и Труновском округах. За счет ветроэнергетики уже генерируется 510 МВт. Помимо ВЭС в регионе также действует крупная солнечная электростанция мощностью 100 МВт, работает Каскад Кубанских ГЭС мощностью около 250 МВт. Как отметил И. Ковалев, в регионе также планируется развивать экологический транспорт. Развитие зеленой энергетики позволило региону предотвратить выброс в атмосферу порядка 890 тыс. т CO_2.

Министр нефти Пакистана М. Малик сообщил о размещении первого заказа на российскую нефть. В будущем закупки могут составить 100 тыс. барр. в сутки. Речь идет только о сырой нефти. На первых этапах ее будет перерабатывать пакистанская Refinery Limited, а после пробного периода и другие НПЗ страны. Исламабад рассчитывает, что импорт из России позволит в будущем удовлетворить до 35% потребности Пакистана в сырой нефти

Вторая ветка ВСТО
Богучанская ГЭС запущена
Продажа квот
Дошли руки до Арктики
Южный поток
Цены на газ
Северный поток достроили

В Германии будут производить водород на морских платформах

Ученые Фраунгоферовского института систем солнечной энергетики (ISE) разработали проект по производству зеленого водорода в открытом море. Производственный комплекс будет состоять из морского ветрогенератора и подключенной к нему электролизной платформы мощностью 500 МВт, которая сможет производить до 50 тыс. т зеленого водорода в год. Морская вода будет опресняться за счет остаточной тепловой энергии электролизера и использоваться для производства газообразного водорода, который на выходе будет проходить очистку, осушку и сжатие до 500 бар, что в 500 раз выше атмосферного давления. После этого водород перекачают на судно, способное перевозить до 400 т. Система имеет масштабируемую модульную конструкцию, легко адаптируемую к различным мощностям. Проект предполагает использование протонообменного электролизера. Согласно подсчетам ISE, для электролизера мощностью 500 МВт потребуется ветрогенератор на 602 МВт, при таком сочетании электролизная установка сможет работать в течение 5 тыс. часов в год. Издержки составят 5,92 евро на кг водорода, а удельная стоимость – 6,37 евро на кг. Эти значения находятся в пределах верхнего порога распространенных в отрасли издержек.

СИБУР планирует построить на ЗапСибНефтехиме новый комплекс производства пропилена дегидрированием пропана и деривативов пропилена (ДГП-2). Строительство включает технологические установки, факельное хозяйство и логистический комплекс. Цель проекта – производство пропилена посредством дегидрирования пропана и переработки пропилена в полипропилен

Правительство расширило план развития СМП

Правительство продолжает работу над созданием инфраструктуры Северного морского пути. Подписанное главой правительства распоряжение, дополняющее план развития СМП до 2035 г. новыми мероприятиями, предполагает создание отечественных образцов наиболее значимого судового комплектующего оборудования, которое необходимо при строительстве судов ледокольного флота, грузовых судов ледового класса, а также аварийно-спасательных судов. Отвечать за эту работу будут Минпромторг, Росатом, Минтранс и МЧС. Всего план развития СМП до 2035 г. насчитывает более 150 мероприятий, общий объем финансирования которых составляет почти 1,8 трлн руб. Одним из приоритетных направлений развития морского транспорта является создание условий для развития СМП в качестве национальной транспортной коммуникации страны.

Первый СПГ-терминал в Гонконге

CLP Power Hong Kong Limited (CLP Power) и Hongkong Electric Co., Ltd (HK Electric) объявили, что FSRU Bauhinia Spirit пришвартовано к месту постоянной стоянки в юго-западных водах Гонконга, что знаменует заключительный этап подготовки к запуску первого в Гонконге СПГ-терминала. FSRU Bauhinia Spirit – крупнейшее в мире FSRU вместимостью танков 263 тыс. м^3. Ожидается, что СПГ-терминал начнет свою работу в середине 2023 г. После ввода в эксплуатацию он будет питать две гонконгские электростанции Black Point в районе Лунг Кву Тан и Lamma в По Ло Цуй на острове Ламма. Black Point – первая электростанция в Гонконге, использующая природный газ для выработки электроэнергии. Ввод объекта в эксплуатацию будет способствовать диверсификации поставок энергоресурсов, обеспечивая гибкость и надежность поставок природного газа для производства электроэнергии.

Компания РН-Ванкор приступила к опытно-промышленной разработке Ичемминского месторождения проекта Восток Ойл. Месторождение находится на левом берегу реки Енисей в 15 км от Ванкорского НГКМ. Начальные извлекаемые запасы – 6,6 млн т нефти. Добываемое сырье будет транспортироваться на объекты подготовки Лодочного месторождения по межпромысловому нефтепроводу

70 %

составит доля трудноизвлекаемых запасов нефти в РФ к 2030 году

Экспортная пошлина на нефть в России с мая 2023 г. вырастет до

14,4 долл. США/т

1 млрд м³

трудноизвлекаемого газа из юрских залежей Южно-Тамбейского ГКМ добыл Ямал СПГ

В 3 раза

Индия увеличит мощность своих АЭС к 2031 г.

На 7 %

в годовом выражении выросла транспортировка газа по магистральным газопроводам в Азербайджане,

общий объем перекаченного газа составил **11,5 млрд м³**

На 3,1 %

до **16,81** млрд долл.

упал объем импорта Китаем природного газа в 1-м квартале 2023 г.

На 60 %

вырос объем реализации СПГ «НОВАТЭКа» на международных рынках в 1 квартале 2023 г.

4 млрд долл.

выделят США Польше на строительство малых ядерных реакторов

С 50 регионами

«Газпром» обновил 5-летние программы газификации

На 2,32 млн барр. в сутки

вырастет спрос на нефть в мире в 2023 г. согласно ожиданиям ОПЕК

До 10 %

упадет доля угля в энергобалансе России к 2050 г.

На 25 %

«РН-Юганскнефтегаз» увеличил строительство кустовых площадок

4 АГЗС

построит «Газпром» на Дальнем Востоке

Более 3 млрд руб.

направят на модернизацию энергоблоков Ростовской АЭС

До рекордных 14,9 млн

баррелей в день выросла загрузка китайских НПЗ в марте

На 11,2 %

Азербайджан увеличил экспорт газа в первом квартале 2023 г.,

в Европу экспортировали **2,9 млрд м³** газа

2 танкера за **$93** млн

построит «HD Korea Shipbuilding» в 2023 г.

Всего компания получила заказы на **64** судна

Более $200 млн

вывели инвесторы из двух биржевых фондов, ориентированных на нефть

В 800 тыс. тонн

оценили дефицит дизтоплива в Казахстане

Около 60

малотоннажных СПГ-заводов намерен построить «Газпром СПГ технологии» до 2030 г.

36 месторождений

«Роснефти» подпадут под законопроект о либерализации экспорта СПГ

На 4,5 %

выросла экономика Китая в первом квартале 2023 г.

Neftegaz.RU
номер 5/2023 г.

УДК 004; 66.092-977

НЕСТАЦИОНАРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПИРОЛИЗА БЕНЗИНОВОЙ ФРАКЦИИ

с учетом образования и накопления кокса

Бунаев Аюр Алексеевич
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов, аспирант Отделения химической инженерии

Долганов Игорь Михайлович
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов, доцент Отделения химической инженерии, к.т.н.

Долганова Ирэна Олеговна
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа природных ресурсов, научный сотрудник Отделения химической инженерии, к.т.н.

ПИРОЛИЗ НА СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ ЯВЛЯЕТСЯ ОСНОВНЫМ ПРОЦЕССОМ, ФОРМИРУЮЩИМ СЫРЬЕВУЮ БАЗУ ПОЛИМЕРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. В РАБОТЕ ПРЕДСТАВЛЕНА РАЗРАБОТКА НЕСТАЦИОНАРНОЙ МОДЕЛИ ПИРОЛИЗА БЕНЗИНОВОЙ ФРАКЦИИ. ДАННАЯ МОДЕЛЬ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ МОДУЛЬ ОПИСАНИЯ КОКСООБРАЗОВАНИЯ, УЧИТЫВАЮЩИЙ ВЛИЯНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТРУКТУР НА ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ РЕАКТОРА НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ. БЫЛИ ПРИВЕДЕНЫ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДОВ ЭТИЛЕНА И ПРОПИЛЕНА, СКОРОСТИ РОСТА СЛОЯ КОКСА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОЦЕССА, ДАВЛЕНИЯ И МАССОВОГО РАСХОДА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

TODAY, PYROLYSIS IS THE MAIN PROCESS THAT FORMS THE RAW MATERIAL BASE OF THE POLYMER INDUSTRY. THE PAPER PRESENTS THE DEVELOPMENT OF A NON-STATIONARY MODEL OF PYROLYSIS OF THE GASOLINE FRACTION. THIS MODEL INCLUDES A MODULE FOR DESCRIBING COKE FORMATION, WHICH TAKES INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE FORMATION OF HIGH-MOLECULAR CARBON STRUCTURES ON THE INNER WALL OF THE REACTOR ON THE THERMODYNAMIC AND KINETIC PARAMETERS OF THE REACTION SYSTEM OVER TIME. THE DEPENDENCES OF THE YIELDS OF ETHYLENE AND PROPYLENE, THE RATE OF GROWTH OF THE COKE LAYER ON THE PROCESS TEMPERATURE, PRESSURE, AND MASS FLOW RATE OF HYDROCARBON FEEDSTOCK WERE GIVEN

Ключевые слова: *пиролиз, математическое моделирование, нестационарная модель, бензиновая фракция.*

Протекающий в настоящее время мировой финансовый кризис, вызванный процессами деглобализации, ставит перед мировыми экономиками новые вызовы. В частности – это переход на шестой технологический уклад, реализуемый по-своему в разных странах или политических общностях, который предполагает в первую очередь разработку и широкое внедрение в промышленность и сельскохозяйственный сектор цифровых технологий предиктивного анализа, обучения персонала и управления производственным процессом. Быстрый и успешный переход на данную экономическую модель обеспечит подавляющее конкурентное преимущество той стране, которая его выполнит и запустит таким образом обратный процесс глобализации, опираясь на свое технологическое преимущество. Поэтому разработка промышленных моделирующих комплексов, в частности – для решения задач в области химической инженерии, является одной из приоритетных задач.

В настоящей работе представлена разработка модели трубчатой печи производства олефинов для нужд нефтехимической промышленности. Актуальность исследования данного процесса обусловлена тем, что на имеющемся уровне научно-технического развития все большее применение находят полимерные материалы в различных сферах деятельности человека. Это, в свою очередь, обеспечивает рост спроса на мономеры, этилен и пропилен, что вызывает соответствующий рост производства данных веществ, как показано на рисунках 1 и 2 [1, 2].

ФАКТЫ

Мономеры

в крупнотоннажном нефтехимическом производстве получают при помощи технологии термического разложения углеводородов в трубчатых печах

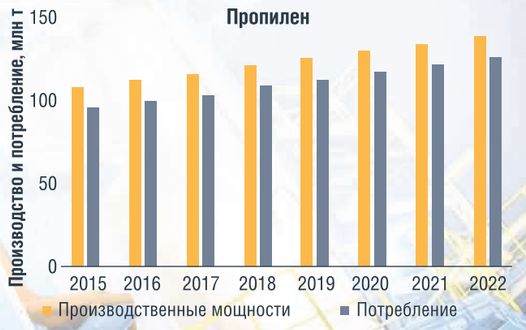
Таким образом, можно отметить, что рост как потребления, так и производства продолжается и на него почти не повлияли последствия пандемии, что косвенно подтверждает необходимость во внедрении системы для анализа процесса, его оптимизации и прогнозирования его состояния с течением времени при различных рабочих режимах.

Теоретические основы процесса и объект исследования

В настоящее время в крупнотоннажном нефтехимическом производстве для получения мономеров применяется технология проведения процесса термического разложения углеводородов в трубчатых печах.

РИСУНОК 1. Динамика производства и потребления этилена в течение последних нескольких лет

РИСУНОК 2. Динамика производства и потребления пропилена в течение последних нескольких лет



Промышленные трубчатые печи пиролиза состоят, кроме отдельных случаев, из двух расположенных одна над другой, секций. В верхней части аппарата находится конвекционная секция. В ней происходит нагрев углеводородного сырья восходящими дымовыми газами, а также смешение с водяным паром разбавления с целью снижения парциального давления. Далее паросырьевая смесь поступает в радиантную секцию, в которой нагрев происходит за счет лучистого тепла, выделяющегося в результате сгорания в горелках топливного газа. В данной секции печи происходят химические процессы: целевые реакции разложения исходных молекул на более легкие, главным образом – непредельные соединения, а также побочные процессы коксообразования. Кокообразование является процессом образования кокса, высокомолекулярных высокоуглеродистых веществ сложного строения, из непредельных соединений, главным образом полиароароматических. Ввод пара разбавления, произведенный в конвекционной секции, обусловлен данным явлением – понижение парциального давления углеводородов снижает скорости реакций, приводящих к уменьшению объема, то есть побочных реакций уплотнения, тогда как целевые реакции, протекающие с увеличением объема, протекают быстрее.

Объектом исследования в настоящей работе является промышленная реализация процесса пиролиза, проводящаяся в трубчатой печи, змеевики радиантной секции которой имеют следующую геометрическую конфигурацию. Паросырьевая смесь поступает четырьмя параллельными потоками по трубам малого диаметра. Далее данные потоки попарно соединяются в два, протекающие по трубам большего диаметра. В свою очередь, два потока также соединяются в один поток, протекающий по трубе наибольшего диаметра. Сырьем данной печи является бензиновая фракция.

Эффективность работы печи определяется в первую очередь составом перерабатываемого сырья и рабочими режимами, при которых проводится процесс [3]. В силу протекания в реакционном потоке побочных процессов коксообразования, переработка углеводородного сырья осуществляется периодически – в определенные моменты времени установка

ФАКТЫ

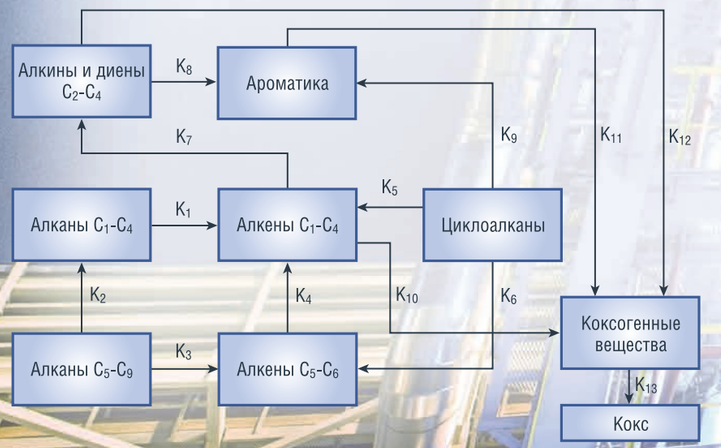
Математическая модель

процессов переработки УВ должна учитывать три проблемы: большой объем вычислений и данных, индивидуальные компоненты системы и установление наличия в сырье всех возможных компонентов

Коксообразование

представляет собой процесс совокупности реакций поликонденсации и полимеризации ароматических веществ

РИСУНОК 3. Формализованная схема превращений



вынужденно останавливает производство с целью проведения регенерации внутренней поверхности радиантного змеевика, в результате которого происходит его очистка от кокса путем выжига отложений данного вещества.

Образование и накопление кокса приводит к уменьшению сечения змеевика. Это, в свою очередь, приводит к тому, что растет перепад давлений между входом в змеевик и выходом из него. При этом растет время контакта и снижаются выходы целевой продукции.

Помимо этого, отложения кокса создают участки теплового напряжения на внешней поверхности змеевиков, поскольку кокс имеет низкую теплопроводность [4]. То есть в данных местах повышается вероятность возникновения прогаров, что является аварийной ситуацией, в результате возникновения которой требуется остановка работы печи пиролиза на продолжительный срок с целью замены змеевика. В силу низкой теплопроводности кокса уменьшается количество тепла, передаваемого к реакционному потоку, что также снижает выходы целевой продукции, поскольку реакции, приводящие к их образованию, являются эндотермическими [5].

Таким образом, в силу термодинамических условий проведения процесса пиролиза кокс образуется в течение всего межрегенерационного цикла, пока его накопление не достигнет некоторого критического уровня. Условия, при которых начинается процесс выжига кокса, определяются в зависимости от рабочего режима, типа перерабатываемого сырья, конструкции печи и свойств материалов, из которых выполнены ее узлы.

Проблематика моделирования и методы исследования

В распоряжении предприятий имеется широкий спектр средств моделирования химико-технологических процессов. Данные инструменты находят применение при проектировании новых производств, а также при анализе существующих, поскольку позволяют существенно облегчить многие этапы работы над проектом и таким образом минимизировать затраты.

При разработке математических моделей процессов переработки углеводородного сырья можно выделить три наиболее значимые проблемы. Во-первых, это большой объем вычислений, которые выполняет модель в ходе своей работы, а также большой объем данных, которые необходимы для проведения данных расчетов. Во-вторых, анализ результатов может быть затруднителен при большом количестве индивидуальных компонентов в системе, поскольку в моделях чаще всего не учитываются дополнительные эффекты их взаимодействия. В-третьих, зачастую сложно установить наличие в сырье процесса всех возможных компонентов, что негативно отражается на возможности сопоставления между собой расчетных и экспериментальных данных.

Модель, представленная в настоящей работе, основана на формализованной схеме реакций, представленной на рисунке 3.

Полная схема реакций, заложенная в модель, включает 1055 реакций. В таблице 1 представлены основные из них. Большинство является реакциями крекинга и образования олефинов, главным образом – этилена, из радикалов.

Основным уравнением математической модели является описание изменения концентрации индивидуального компонента по длине змеевика:

$$\frac{dC_i}{dl} \cdot u = \sum W_{i,l,t}, \qquad (1.21)$$

где dl – шаг интеграции по длине змеевика, м, u – линейная скорость потока, м/с, $\sum W_i$ – суммы соответствующих скоростей реакций, протекающих на расстоянии l от входа в змеевик в момент времени t, в которые вовлечен компонент i, умноженные на стехиометрические коэффициенты данного компонента в реакции, моль/л.

Таким образом, расчет по модели является решением системы дифференциальных уравнений. На определенном этапе разработки было принято решение о реализации модели как псевдостационарной, где изменения по времени отражаются за счет накопления кокса и соответствующем изменении термодинамических параметров, а не непосредственно в описании динамики концентрации компонента.

Значения сумм скоростей $\sum W_{i,l,t}$ рассчитывается по методу Рунге-Кутта:

$$\begin{aligned} F_1 &= \sum a_{i,j} \cdot K_{j,l,t} \cdot \prod C_{k,l,t}{}^{\beta_{k,j}} \\ F_2 &= \sum a_{i,j} \cdot K_{j,t} \cdot \prod \left(C_{k,l,t} + \frac{\Delta t}{2} \cdot F_1\right)^{\beta_{k,j}} \\ F_3 &= \sum a_{i,j} \cdot K_{j,t} \cdot \prod \left(C_{k,l,t} + \frac{\Delta t}{2} \cdot F_2\right)^{\beta_{k,j}} \\ F_4 &= \sum a_{i,j} \cdot K_{j,t} \cdot \prod \left(C_{k,l,t} + \Delta t \cdot F_3\right)^{\beta_{k,j}} \\ \sum W &= \frac{1}{6} \cdot (F_1 + 2F_2 + 2F_3 + F_4) \end{aligned} \qquad (1.22)$$

где $a_{i,j}$ – стехиометрический коэффициент компонента i в реакции j, $C_{k,l,t}$ – концентрация компонента k в заданной точке, моль/л, $\beta_{k,j}$ – стехиометрический коэффициент компонента k в реакции j.

Константы скоростей рассчитываются по полному уравнению Аррениуса:

ТАБЛИЦА 1

Реакция	Энтальпия реакции, Дж/моль
C3H8 = CH3* + C2H5*	367 570
n-C4H10 = CH3* + n-C3H7*	367 570
n-C4H10 = 2 C2H5*	341 315
i-C4H10 = CH3* + i-C3H7*	393 825
n-C5H12 = C2H5* + n-C3H7*	341 315
i-C5H12 = C2H5* + i-C3H7*	341 315
n-C6H14 = 2 n-C3H7*	341 315
n-C6H14 = C2H5* + n-C4H9*	341 315
C2H6 = 2 CH3*	393 825
C2H5* = C2H4 + H*	183 785
n-C3H7* = C2H4 + CH3*	131 275
i-C3H7* = C3H6 + H*	157 530
n-C4H9* = C2H4 + C2H5*	105 020
2 H* = H2	-446 335

ФАКТЫ

10%

максимальная погрешность расчетов состава выходящего потока

$$K_{j,l,t} = K_{0j} \cdot \frac{P_{0,l,t}}{T_{l,t}{}^2} \cdot exp\left(\frac{-E_j}{RT_{l,t}}\right), \qquad (1.18)$$

где $K_{j,l,t}$ – константа скорости реакции j на расстоянии l от входа в змеевик в момент времени t, моль/(л·с), K_0, j – предэкспоненциальный множитель данной реакции, моль·°K²/(Па·л·с), $P_{0,l,t}$ – давление потока на расстоянии l от входа в змеевик в момент времени t, Па, $T_{l,t}$ – температура в сегменте змеевика, находящегося на расстоянии l от входа в змеевик в момент времени t, °K, E_j – энергия активации реакции j, Дж/моль, R – газовая постоянная, Дж/(моль·K).

При расчете константы скорости на очередной итерации расчета используется значение давления в заданной точке, изменение которого, в свою очередь, при прохождении потоком змеевика рассчитывается по уравнению Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{\Delta l}{d} \cdot \frac{\rho_{газ} \cdot u^2}{2}, \qquad (1.6)$$

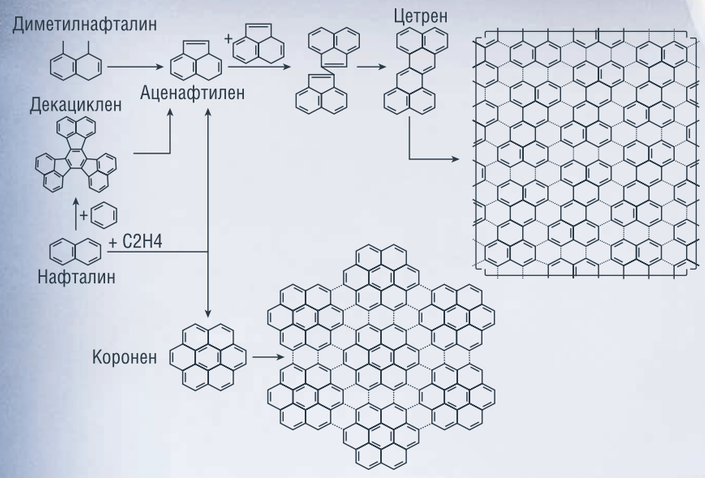
где Δl – длина элемента змеевика, м, d – эффективный диаметр элемента змеевика, м, u – линейная скорость реакционного потока в данном элементе, м/с, λ – коэффициент потерь на трение.

Эффективный диаметр элемента длины Δl рассчитывается как:

$$d = D_i - 2 \cdot \delta_{l,t}, \qquad (1.9)$$

где D_i – диаметр чистого элемента змеевика, м, $\delta_{l,t}$ – толщина слоя кокса в заданной точке, м.

РИСУНОК 4. Предполагаемая схема реакций процесса коксообразования



Таким образом, накопление кокса напрямую влияет на изменение давления в змеевике как по его длине, так и с течением времени, что, в свою очередь, оказывает воздействие на кинетическую составляющую процесса. Изменение температуры реакционного потока рассчитывается как:

$$\rho_{\text{газ}} \cdot C_p \cdot u \cdot \frac{dT}{dl} = \sum_r Q_r \cdot W_r + \frac{K \cdot F_j}{V_j} \cdot (T_{\text{ст},i,j} - T_{i-1,j}), \quad (1.13)$$

где C_p – молярная удельная теплоемкость реакционного потока, Дж/(моль·°К), Q_r – тепловой эффект реакции r, Дж/моль, W_r – скорость реакции r, моль/(л·с), K – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°К), F_j – общая площадь змеевика в момент времени j, м², V_j – общий объем змеевика в момент времени j, м³, $T_{\text{ст},i,j}$ – температура внутренней стенки в координате i в момент времени j, °К, $T_{i,j}$ – температура реакционного потока в координате i-1 в момент времени j, °К.

ФАКТЫ

0,025 г

кокса в секунду составляет скорость накопления кокса при минимальной температуре

Удельная теплоемкость и энтальпии образования были рассчитаны для каждого из компонентов системы в среде квантово-химических расчетов Gaussian 16.
В качестве метода расчета был выбран трехпараметрический гибридный функционал Бека, а в качестве базиса – 3-21G. Данные значения были рассчитаны при температурах 780, 820 и 850 °С, и на основании полученных значений были выведены функциональные зависимости для каждого компонента от температуры потока.

Общая площадь внутренней поверхности змеевика рассчитывается как:

$$F_j = \sum_i \pi \cdot (D_i - \delta_{i,j}) \cdot \Delta l. \quad (1.16)$$

ТАБЛИЦА 2. Компонентный состав бензиновой фракции

Компонент	Содержание в сырье, % масс	Компонент	Содержание в сырье, % масс	Компонент	Содержание в сырье, % масс
CH4	0,001	цикло-C6H8(МЦПД)	1,505	1-C8H16	0,658
C2H6	0,011	цикло-C6H10	1,505	цикло-C8H16(ДМЦГ)	4,118
H-CH=O	0,055	1-C6H12	0,003	н-C8H18	6,178
C3H8	0,458	2-C6H12	0,001	ВС-C9H8	0,102
CH3COH	0,058	изо-C6H12	0,003	ВС-C9H10	0,006
C4H6	0,001	цикло-C6H12	2,919	C9H10(АМС)	0,102
1-C4H8	0,028	н-C6H14	8,469	1-C9H18	0,555
2-C4H8	0,124	2-C6H14	5,656	н-C9H20	2,999
изо-C4H8	0,028	3-C6H14	3,933	C10H8(Нафталин)	0,0345
н-C4H10	3,052	C7H8	1,05	ВС-C10H10	0,0345
изо-C4H10	0,719	цикло-C7H10(МЦГДН)	1,8675	C10H18(Нафтен)	0,566
цикло-C5H6(ЦПД)	1,732	цикло-C7H12(МЦГЕН)	1,8675	н-C10H20	0,031
1,3-C5H8	0,049	1-C7H14	0,001	изо-C10H20	0,018
1-C5H10	0,258	3-C7H14	0,001	н-C10H22	0,222
2-C5H10	0,24	C7H14(МЦГ)	4,816	C11H10(МНафталин)	0,05
изо-C5H10	0,725	н-C7H16	4,403	н-C11H24	0,08
н-C5H12	19,703	2-C7H16	2,478	C12H12(DMH)	0,034
изо-C5H12	10,697	3-C7H16	1,956	C12H14(Тетралин)	0,009
C6H6	0,506	3,3-C7H16	0,522	н-C13H28	0,023
цикло-C6H8	1,505	C8H10	1,274		

ТАБЛИЦА 3. Экспериментальные и расчетные значения состава пирогаза

Компоненты	Содержание экспериментальное, % масс.	Содержание расчетное, % масс.	Ошибка, %
Метан-водородная фракция	16,6 = 15,6 (метан) + 1 (водород)	16,54 = 15,44 + 1,1	0,4 (1,02; 10)
Этилен	31,1	31,01	0,29
Пропилен	14,6	14,7	0,68
Бутан-бутиленовая фракция	8,5	8,65	1,76
Пироконденсат, фр. C5+	12,3	12,4	0,8
Ароматические углеводороды	16,6	16,42	0,79
Кислородсодержащие вещества	0,3	0,28	6,66

Общий внутренний объем змеевика рассчитывается как:

$$V_j = \sum_i \pi \cdot \left(\frac{D_i - \delta_{i,j}}{2}\right)^2 \cdot \Delta l. \quad (1.17)$$

Через данные параметры температура реакционного потока, а как следствие – кинетика процесса связана с коксообразованием, что позволяет данному параметру иметь псевдостационарную природу.

Процесс коксообразования представляется как совокупность реакций поликонденсации и полимеризации ароматических веществ [6–8]. То есть в течение данного побочного процесса происходит укрупнение углеродных структур, и таким образом растет соотношение углерода к водороду [9–12].

В представленной модели к коксогенам отнесены коронен и цетрен, из которых образуется кокс двух подтипов. Обобщенная схема коксообразования приведена на рисунке 4.

Для коксогенов основное уравнение динамики концентрации имеет вид:

$$\frac{dC}{dl} \cdot u = \sum W - R_s, \quad (4.1)$$

где R_s – скорость осаждения коксогенов к пристеночной области из реакционного потока, моль/(л·с), которая рассчитывается как [13]:

$$R_s = \frac{0.023}{(0.25 \cdot \pi)^{0.8}} \cdot \left(\frac{G^{0.8} \cdot \mu^{0.2} \cdot \omega_{\text{масс.}}}{D^{1.8} \cdot Sc^{\frac{2}{3}} \cdot M_{\text{см}}}\right), \quad (4.2)$$

где G – массовый расход, кг/с, $\omega_{\text{масс.}}$ – массовая доля коксогенов в реакционном потоке, D – диаметр змеевика, мм, Sc – критерий Шмидта, $M_{\text{см}}$ – молярная масса смеси, г/моль, μ – коэффициент внутреннего трения газа, Па·с.

Экспериментальная часть

При работе с моделью применялся состав сырья, приведенный в таблице 1.

Данный состав был задан в соответствии с результатами хроматографического анализа бензиновой фракции, используемой в качестве сырья на действующей установке пиролиза на одном из нефтехимических предприятий России.

ФАКТЫ

в 2 раза

увеличиваются выходы олефинов при повышении температуры от 780 до 850 °С

В среднем расход сырья в печи составлял 4100 кг/ч на поток, расход пара 2700 кг/ч на поток, давление на входе в змеевик 0,4 МПа, температура паросырьевой смеси на входе в реактор 780 °С.

Для проверки адекватности разрабатываемой модели было проведено сравнение полученных с помощью модели результатов состава пирогаза с экспериментальными данными. Расчетные и экспериментальные значения приведены в таблице 2.

В среднем для данной установки длина межрегенерационного цикла составляет 40–41 день. Оценка адекватности модели коксообразования и прогноз длительности цикла был выполнен по следующей методике. В течение года значение давления на выходе из аппарата находилось в диапазоне 0,08–0,1 МПа. Так как при отложении кокса возрастает гидравлическое сопротивление, то данное значение будет снижаться. Соответственно, для поддержания давления в заданном диапазоне необходимо увеличить давление паросырьевой смеси. При выходе значения давления пирогаза за нижнюю границу диапазона давление на входе соответственно повышается. Если давление на входе достигает 0,75 МПа, считается, что межрегенерационный цикл в модели закончен. Значения давлений в течение межрегенерационного цикла представлены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 4. Значения давления в течение межрегенерационного цикла

Количество прошедших дней цикла	Давление на входе в змеевик	Давление на выходе из змеевика
1	0,4	0,01
2	0,402	0,099
3	0,406	0,099
4	0,410	0,099
5	0,413	0,099
6	0,416	0,098
7	0,419	0,098
8	0,422	0,098
9	0,424	0,097
10	0,426	0,097
20	0,454	0,095
30	0,530	0,093
40	0,75	0,09

РИСУНОК 5. Зависимость скорости накопления кокса от температуры сырья

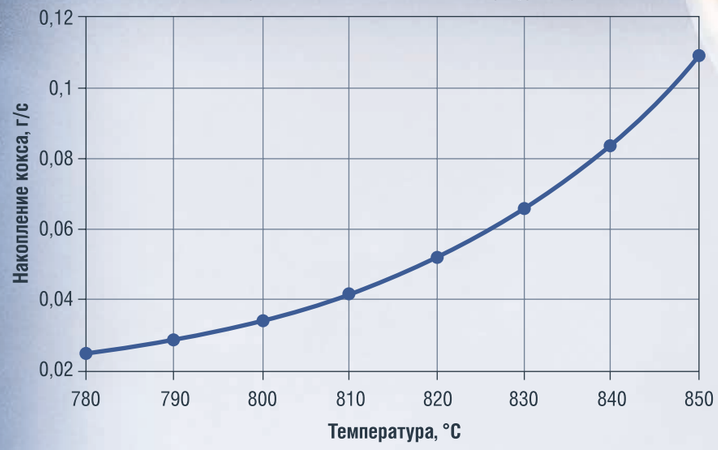


РИСУНОК 6. Зависимость выходов этилена и пропилена от температуры

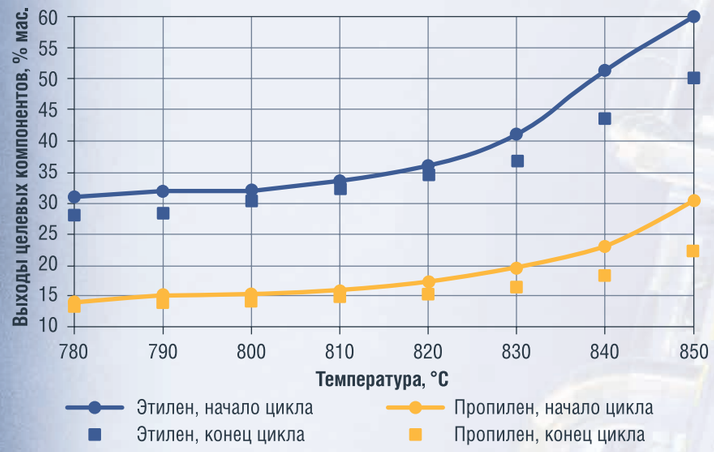
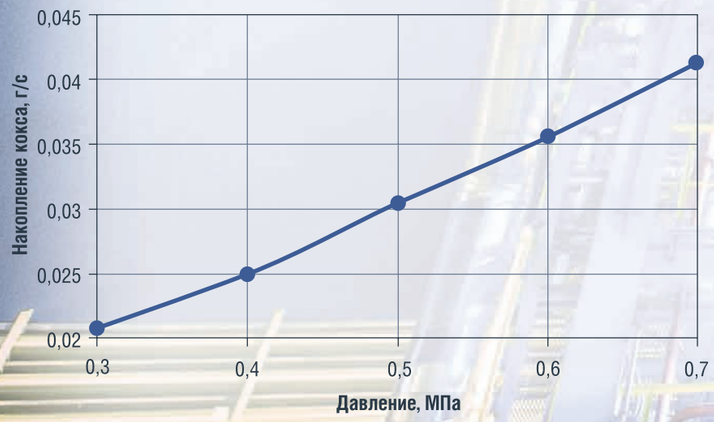


РИСУНОК 7. Зависимость скорости накопления кокса от давления сырья



Таким образом, исходя из того, что ошибки расчетов состава выходящего потока не превышают 10%, а также того, что длительность межрегенерационного цикла в модели совпадает с таковым для реальной установки, можно сказать, что модель в целом адекватно описывает процесс. Уровень достоверности 10% был выбран, поскольку это точность хроматографического анализа.

При работе с моделью была выведена зависимость скорости накопления кокса от температуры паросырьевой смеси на входе в змеевик, график которой представлен на рисунке 5.

Температура варьировалась в диапазоне от 780 до 850 °С, так как данные значения указаны в качестве граничных в техническом регламенте установки. При минимальной температуре скорость накопления кокса также минимальна и составляет примерно 0,025 г кокса в секунду. С ростом температуры скорость накопления значительно возрастает: при повышении температуры на 10 °С данное значение увеличивается примерно в 1,2 раза. Таким образом, при максимальной температуре накопление составляет примерно 0,11 г/с.

На рисунке 6 представлена зависимость выходов этилена и пропилена от температуры процесса.

Выходы олефинов при повышении температуры от 780 д 850 °С увеличиваются почти в два раза. Однако при этом наблюдается также значительное снижение выходов целевых веществ в течение межрегенерационного цикла – возрастает разница между выходами в начале и в конце. При этом в силу роста скорости накопления кокса продолжительность цикла значительно снижается: с 40-41 дня при 780 °С до 4-5 дней при 850 °С.

При 790 °С происходит снижение межрегенерационного цикла до 26 дней, то есть в 1,5 раза, тогда как выходы этилена и пропилена увеличиваются примерно на 2,5%. Более высокие значения температуры показывают худшее соотношение сокращения межрегенерационного цикла к росту выходов олефинов. Таким образом, повышение температуры не является целесообразным при оптимизации работы установки.

РИСУНОК 8. Зависимость выходов этилена и пропилена от давления

РИСУНОК 9. Зависимость скорости накопления кокса от расхода сырья

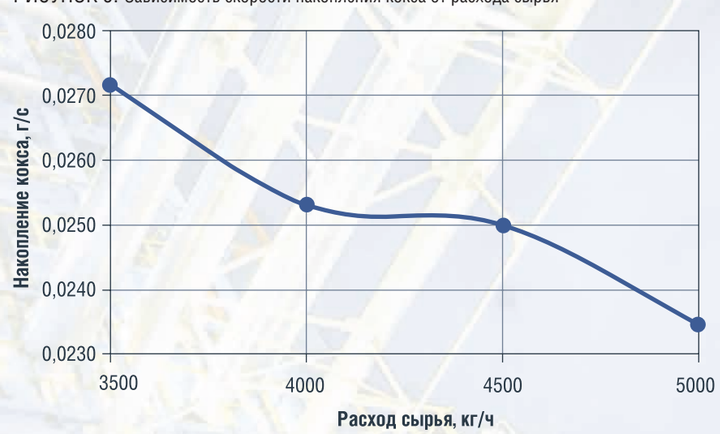
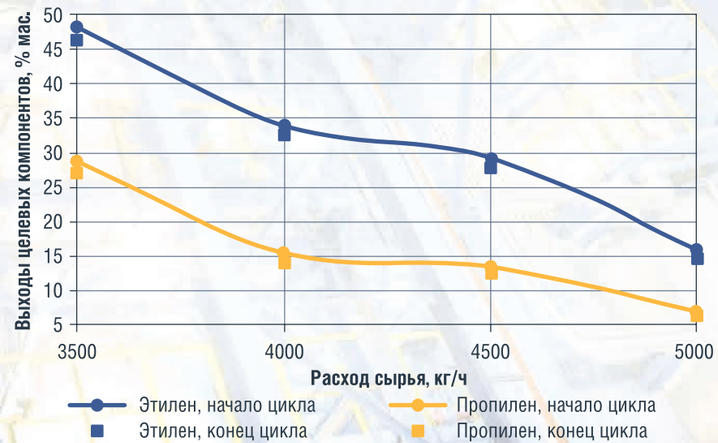


РИСУНОК 10. Зависимость выходов этилена и пропилена от расхода сырья



Следующей была исследована зависимость от давления сырья на входе в печь пиролиза. График зависимости скорости роста кокса от данного параметра представлен на рисунке 7.

Диапазон значений находится в интервале между 0,3 и 0,7 МПа, поскольку он указан в качестве допустимого в технологическом регламенте установки. Данная зависимость имеет линейную характеристику: при повышении давления на 0,1 МПа скорость накопления возрастает на 0,005 г/с. То есть скорость возрастает с примерно 0,02 г/с при 0,3 МПа до 0,041 г/с при 0,7 МПа.

На рисунке 8 представлена зависимость выходов целевых продуктов на начало и конец межрегенерационного цикла от давления.

При повышении давления выходы продуктов в течение межрегенерационного цикла снижаются примерно на 2,5–3% масс. для этилена и 1–2% для пропилена на всем диапазоне, то есть снижение выходов является меньшим, чем при повышении температуры. Рост выхода при повышении давления с 0,4 МПа до 0,7 МПа для этилена составляет примерно 9% масс., для пропилена – примерно 3,8% масс. При этом длительность межрегенерационного цикла снижается с 40 дней до 14 – в 2,86 раз. При снижении давления до 0,3 МПа происходит снижение выходов на 0,76% масс. и 0,2% масс. соответственно, при увеличении межрегенерационного цикла до 48 дней, на 20%.

Таким образом, более оптимальным может быть снижение давления сырья.

Также была исследована зависимость параметров работы установки от расхода сырьевой бензиновой фракции. График зависимости скорости накопления кокса от значения данного параметра представлен на рисунке 9.

Расход варьировался в диапазоне от 3500 до 5000 кг/ч, как предусмотрено регламентом установки.

При увеличении расхода сырья скорость накопления уменьшается с 0,0272 г/с при 3500 кг/ч до 0,0235 г/с при 5000 кг/ч, при этом наблюдается участок между 4000 и 4500 кг/ч, в котором снижения

скорости почти не происходит. Снижение скорости накопления можно объяснить тем, что снижается время контакта и, соответственно, процессы, как целевые, так и побочные, не успевают пройти в полной мере, что подтверждается зависимостью выходов этилена и пропилена на рисунке 10.

С ростом расхода сырья снижаются выходы целевых продуктов, при этом наблюдается также участок незначительного снижения, а в течение межрегенерационного цикла не наблюдается большого снижения выработки целевой продукции: снижение составляет примерно 1–2 % масс. для обоих олефинов.

При повышении расхода до 4500 кг/ч длительность межрегенерационного цикла останется примерно на том же уровне – 39–40 дней, при этом выходы снизятся на 1 % масс. для этилена и 1,5 % масс. для пропилена. Таким образом, в течение цикла будет получено 1252,8 и 583,2 тонны продукции соответственно, что на 3 и 1,6 % соответственно больше, чем при заданных изначально условиях. При повышении расхода до 5000 кг/ч длительность цикл вырастет до 43 дней, тогда как выработка олефинов упадет до 15,85 % масс. и 7,05 % масс. для этилена и пропилена соответственно. То есть, в течение цикла будет получено 760,8 и 336 тонн или же на 37,7 и 41,3 % соответственно по сравнению с начальными условиями.

Снижение расхода до 3500 кг/ч снижает длительность цикла до 32 дней, однако при этом возрастают выходы этилена и пропилена до 48 и 29 % масс. соответственно. То есть при данной длине цикла и расходе будет получено больше на 5,74 и 35 % соответственно.

Таким образом, целесообразно как повышение расхода до 4500 кг/ч, так и его снижение до 3500 кг/ч.

Выводы

На основании приведенных выше зависимостей можно сделать следующие выводы.

Увеличение температуры является нецелесообразным, поскольку при этом снижается эффективность процесса. Несмотря на значительный рост выходов олефинов, примерно в два раза, скорость накопления кокса также возрастает, но непропорционально больше – почти в четыре раза, что сокращает длительность межрегенерационного цикла в 8 раз. Соответственно, в условиях повышенных температур при большей скорости коксообразования вырастет вероятность возникновения прогаров змеевика. Также повышение температуры связано с увеличением расхода топливного газа, а также возможной заменой горелок и футеровки печи.

Повысить эффективность процесса возможно снижением давления сырья. Это позволит увеличить межрегенерационный цикл в 1,2 раза, тогда как снижение выходов целевых олефинов составит менее 1 %.

Также положительно на эффективности работы установки сказывается увеличение расхода до 4500 кг/ч, при котором длительность межрегенерационного цикла остается той же, выходы этилена и пропилена снижаются в относительном выражении, однако за счет большего количества перерабатываемого сырья возрастает выработка целевой продукции в абсолютном выражении. Альтернативной данному решению является снижение расхода до 3500 кг/ч. При этом снизится длительность цикла в 1,25 раза, однако за счет значительного роста выхода олефинов в относительном выражении, особенно пропилена, тоннаж получаемой продукции увеличится.

ФАКТЫ

До **26** дней

снижается межрегенерационный цикл при температуре 790 °C

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ.

Литература

1. *Wang, X., Song, Q., Wu, Y., Li, X., Li, T., & Zeng, X. Modelling and numerical simulation of n–heptane pyrolysis coking characteristics in a millimetre–sized tube reactor // Combustion and Flame. – 2019. – V. 201. – P. 44–56.*
2. *K. Zhang, C. Banyon, J. Bugler, H.J. Curran, A. Rodriguez, O. Herbinet, F. Battin–Leclerc, C. B'Chir, K.A. Heufer An updated experimental and kinetic modeling study of n–heptane oxidation // Combust. Flame. – 2016. – V. 172. – P. 116–135.*
3. *Y. Wang, A. Raj, S.H. Chung (2013) A PAH growth mechanism and synergistic effect on PAH formation in counterflow diffusion flames // Combust. Flame. – 2013. – V. 160. – P. 1667–1676.*
4. *Пиролиз углеводородного сырья/Мухина Т.Н., Барабанов Н.Л., Бабаш С.Е. и др. – М.: Химия, 1987. – 240 с.*
5. *Lu Liqiang, M. Brennan Pecha, Gavin M. Wiggins, Xu Yupeng, Gao Xi, Bryan Hughes, Mehrdad Shahnam, William A. Rogers, Daniel Carpenter, James E. Parks II Multiscale CFD simulation of biomass fast pyrolysis with a machine learning derived intra–particle model and detailed pyrolysis kinetics // Chemical Engineering Journal. – 2022. – V. 431. – P. 10–16.*
6. *Anuar Sharuddin S.D., Abnisa F., Wan Daud W.M.A., Aroua M.K. A review on pyrolysis of plastic wastes // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 115. – P. 308–326.*
7. *Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens J. The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: from re–use to energy and chemicals // Progress in Energy and Combustion Science. – 2010. – V. 36. – P. 103–129.*
8. *Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review // Waste Management. – 2012. – V. 32. – P. 625–639.*
9. *Remiro A., Valle B., Aramburu B., Aguayo A.T., Bilbao J., Gayubo A.G. Steam reforming of the bio–oil aqueous fraction in a fluidized bed reactor with in situ CO2 capture // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 2013. – V. 52. – P. 17087–17098.*
10. *Trimm D.L. Coke formation and minimisation during steam reforming reactions // Catalysis Today. – 1997. – V. 37. – P. 233–238.*
11. *Chen D., Christensen K.O., Ochoa–Fernandez E., Yu Z., Tøtdal B., Latorre N., Monzon A., Holmen A. Synthesis of carbon nanofibers: effects of Ni crystal size during methane decomposition // Journal of Catalysis. – 2005. – V. 229. – P. 82–96.*
12. *Karim A.M., Su Y., Sun J., Yang C., Strohm J.J., King D.L., Wang Y. A comparative study between Co and Rh for steam reforming of ethanol // Applied Catalysis B: Environmental. – 2010. – V. 96. – P. 441–448.*
13. *Fernandez-Baujin J. M., Solomonov S. M. New reactor design offers benefits // Oil and Gas Journal. – 1976. – V. 74. – P. 94–95.*

KEYWORDS: *pyrolysis, mathematical modeling, non-stationary model, gasoline fraction.*

3–6 ОКТЯБРЯ 2023

XII ПЕТЕРБУРГСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ

ГАЗОВЫЙ ФОРУМ

РЕКЛАМА

САМАЯ АКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПМГФ В НАШЕМ TELEGRAM-КАНАЛЕ @GASFORUMSPB

КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР ЭКСПОФОРУМ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1

+7 (812) 240 40 40 (ДОБ. 2273, 2626) GF@EXPOFORUM.RU

18+

GAS-FORUM.RU

Полная версия журнала
доступна по подписке