

УДК 57.044.665.633; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2023-1.13>

<https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

<https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

<https://orcid.org/0000-0003-2438-2851>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ КАК МЕТОД РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ



Г. Ж. СЕЙТЕНОВА¹,
кандидат химических наук,
профессор,
gainiseitenova@gmail.com



Р.М. ДЮСОВА²,
кандидат технических наук,
ассоциированный профессор,
riza92@bk.ru



Г.Р. БУРУМБАЕВА³,
кандидат технических наук,
RBI FEAS Engineer,
burumbaeva.galiya@gmail.com

¹ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Л. ГУМИЛЕВА,
Республика Казахстан, 010008, г. Астана, ул. Сатпаева, 2

²НАО «ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ»,
Республика Казахстан, 140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64

³ТОО «ТЕНГИЗШЕВРОЙЛ»,
Республика Казахстан, 060011, г. Атырау, ул. Сатпаева, 3

Авторами проведены расчеты по повышению ресурсоэффективности, энергосбережения процессов нефтепереработки (крекинга, риформинга, изомеризация) методом математического моделирования с увеличением глубины переработки нефти, учитывающие состав перерабатываемого сырья.

Приведены результаты расчетов по оптимизации действующих установок на реальных технологических условиях одного нефтеперерабатывающего предприятия. Результаты расчетов могут быть внедрены в производство.

Разработаны универсальные моделирующие программы, которые могут быть использованы для повышения ресурсоэффективности установки каталитического крекинга, риформинга и изомеризации, прогнозирования группового углеводородного состава потока после реактора (в двух последних процессах), выхода продуктов с установки, группового состава и октанового числа бензина, а также определения оптимального режима работы реактора.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нефтепереработка, нефтехимия, математическое моделирование, оптимизация, энергосбережение, ресурсоэффективность.

РЕСУРСТАРДЫ ҮНЕМДЕУ ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІ ӘДІСІ РЕТІНДЕ МҰНАЙ ӨНДЕУ ПРОЦЕСТЕРІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Г.Ж. СЕЙТЕНОВА¹, химия ғылымдарының кандидаты, профессор, gainiseitenova@gmail.com
 Р.М. ДЮСОВА², техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, riza92@bk.ru
 Г.Р. БУРУМБАЕВА³, техника ғылымдарының кандидаты, RBI FEAT Engineer
burumbaeva.galiya@gmail.com

¹Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ,
 Қазақстан Республикасы, 010008, Астана қ., Сәтпаев к., 2

²«ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІ» КЕАҚ,
 Қазақстан Республикасы, 140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64

³«ТЕҢІЗШЕВРОЙЛ» ЖШС,
 Қазақстан Республикасы, 060011, Атырау қ., Сатпаев к., 3

Авторлар қайта өңделетін шикізаттың құрамын ескеретін мұнай өңдеу тереңдігін ұлғайта отырып, математикалық модельдеу әдісімен мұнай өңдеу процестерінің (крекинг, риформинг, изомерлеу) ресурс тиімділігін арттыру, энергия үнемдеу бойынша есептеулер жүргізді.

Бұл мақалада бір мұнай өңдеу кәсіпорнының нақты технологиялық жағдайында қолданыстағы қондырғыларды оңтайландыру бойынша есептеулердің нәтижелері келтірілген. Есеп айырысу нәтижелері өндіріске енгізілуі мүмкін.

Авторлар каталитикалық крекинг, риформинг және изомерлеу қондырғысының ресурс тиімділігін арттыру, реактордан кейінгі ағынның топтық көмірсутек құрамын болжау (соңғы екі процесте), қондырғылардан өнімдердің шығуы, бензиннің топтық құрамы мен октан саны, сондай-ақ реактордың оңтайлы жұмыс режимін анықтау үшін пайдалануға болатын әмбебап модельдеу бағдарламаларын әзірледі.

ТҮЙІНДІ СӨЗДЕР: мұнай өңдеу, мұнай химиясы, математикалық модельдеу, оңтайландыру, энергия үнемдеу, ресурс тиімділігі.

MATHEMATICAL MODELING OF OIL REFINING PROCESSES AS A METHOD OF RESOURCE SAVING AND ENERGY EFFICIENCY

G.ZH. SEITENOVA¹, Candidate of Chemical Sciences, Professor, gainiseitenova@gmail.com
 R.M. DYUSOVA², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, riza92@bk.ru
 G.R. BURUMBAYEVA³, Candidate of Technical Sciences, Engineer RBI FEAT
burumbaeva.galiya@gmail.com

¹L.N. GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY
 Satpayev Str., 2, Astana, RK, 010008

²NAO "TORAIGYROV UNIVERSITY",
 Lomov Street, 64, Pavlodar, RK, 140008

³TOO "TENGIZCHEVROIL",
 Satpayev Str., 3, Atyrau, RK, 060011

The authors carried out calculations to increase resource efficiency, energy saving of oil refining processes (cracking, reforming, isomerization) by mathematical modeling with an increase in the depth of oil refining, taking into account the composition of the processed raw materials.

This article presents the results of calculations for optimizing existing installations under real technological conditions of one oil refinery. The results of calculations can be implemented in production.

The authors have developed universal modeling programs that can be used to increase the resource efficiency of a catalytic cracking, reforming and isomerization plant, predict the group hydrocarbon composition of the flow after the reactor (in the last two processes), the output of products from the plant, the group composition and octane number of gasoline, as well as determine the optimal operating mode of the reactor.

KEY WORDS: oil refining, petrochemistry, mathematical modeling, optimization, energy saving, resource efficiency.

Введение. Согласно данным <https://energystats.enerdata.net/> [1], Казахстан перерабатывает в 5 раз меньше нефти, чем добывает (18Mt /87Mt); Россия перерабатывает нефти меньше, чем в 2 раза (273Mt /523Mt); Китай перерабатывает больше в 3 раза, чем добывает (686Mt / 208Mt); США перерабатывает больше, чем добывает в 1,2 раза и является лидером среди нефтепереработчиков в мире, занимая 20 % мирового рынка (815 Mt /694Mt).

Казахстан среди стран-нефтепереработчиков отстает даже от стран, которые не имеют своей нефти, и остается до сих пор сырьевой базой.

Нефтеперерабатывающие заводы Казахстана увеличили свой показатель глубины переработки до 81% (для сравнения, этот показатель в США и Европе – 100%) после проведенной модернизации 2018-2019 гг.

Мощность переработки нефти необходимо наращивать увеличением глубины переработки используемых ресурсов и развитием нефтегазохимии в стране, о чем говорил Президент РК в своем Послании в 2020 году, т.к. высокие темпы роста нефтегазохимии, обгоняющие темпы роста ВВП, являются визитной карточкой любой страны этой отрасли.

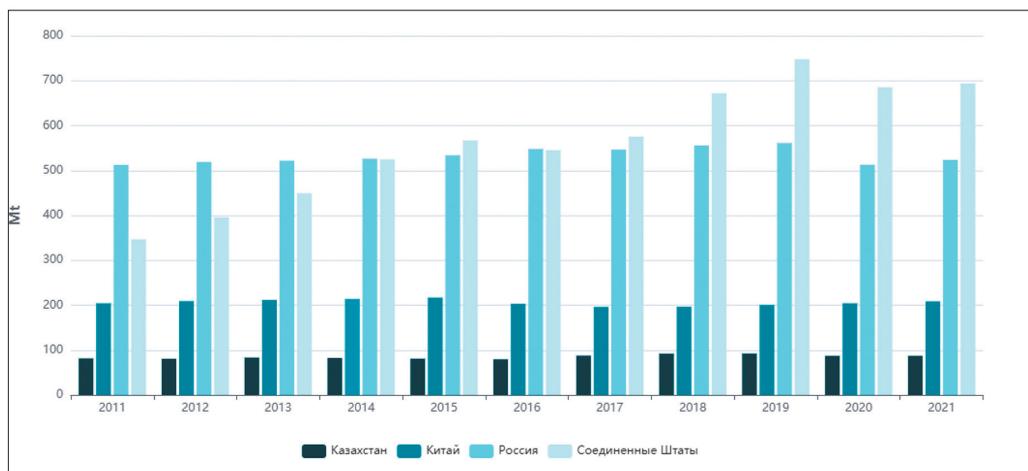


Рисунок 1 – Добыча нефти по странам

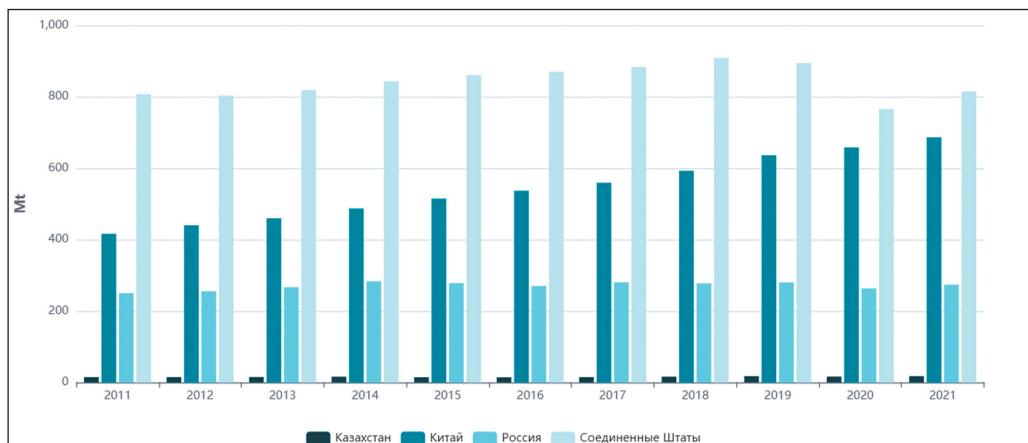


Рисунок 2 – Производство нефтепродуктов по странам

Дискуссии о строительстве нового нефтеперерабатывающего завода идут много лет в правительстве РК. По последними информационным данным – Проект комплексного плана социально-экономического развития региона Улытауской области на 2022–2026 гг., который предусматривает строительство нефтеперерабатывающего завода в Жезказгане мощностью 1 млн тонн в год за 480 млрд тенге. Ранее министр энергетики РК Болат Акчулаков на брифинге 5 сентября 2022 г. сообщил, что вместо строительства четвертого нефтеперерабатывающего завода в Казахстане прорабатывают возможность расширения мощности Шымкентского НПЗ. Завод способен увеличить мощность переработки нефти в 1,5 раза – до 9 млн тонн в год.

Материалы и методы исследования. Для изучения и прогнозирования увеличения мощности и глубины переработки нефти действующих установок отлично подходит *метод математического моделирования процессов*. Метод эффективно решает проблемы рационального использования природных углеводородов, выбора вариантов переработки нефти, прогнозирования и планирования состава, выхода и качества продуктов, оптимизации действующих установок переработки нефти, повышения ресурсоэффективности, энергосбережения. Также с применением математической модели процесса возможна отработка технологических режимов эксплуатации нового и действующего оборудования и адаптация установок в условиях изменения состава сырья и глубины залегания нефти.

Метод математического и кинетико-термодинамического моделирования является основным подходом к решению задач оптимизации действующих установок переработки нефтяного сырья на мировом уровне. Авторами (G. F. Froment, X. Kang, Т.М. Мурзагалеев, Hua Zhou, E. Baudrez, J. Carella, M. Sedighi, А.Н. Загоруйко, А.С. Белый, А.С Носков) разработаны математические модели процессов нефтепереработки, основанные на агрегировании компонентов сырья в псевдокомпоненты, по фракционному составу потоков установки, и группам углеводородов, входящих в сырьевой поток и продукты установки. При этом формирование псевдокомпонентов по фракционному составу не учитывает разной реакционной способности углеводородов внутри выделенных групп, в то время как групповой подход характеризу-

ется информацией о механизме реакции с усредненной реакционной способностью групп углеводородов.

Большое количество работ посвящено моделированию процессов переработки нефти с применением готовых прикладных программ, таких как Hysys, Hysim, Aspen Plus, Speed UP, Pro II, ProVision, PROSIM и др. [2]

В настоящее время лидирующие позиции на рынке США и Канады занимают продукты трех компаний – Simulation Sciences (SimSci), Aspen Technologies и Huprotech [3,4].

Пакет HYSYS позволяет выполнять статическое и динамическое моделирование практически всех основных процессов газопереработки, нефтепереработки и нефтехимии. Он имеет оригинальный алгоритм расчета ректификационных колонн. Система HYSYS включает в себя: Модуль HYSYS/ Dynamics – комплексное моделирование всего производства при расчете прибыльности, управляемости, безопасности процесса и позволяет инженерам одновременно иметь как статическую (проектную), так и динамическую (в процессе работы) картину производства [5,6].

Системы Aspen Plus и Speed Up в настоящее время широко известны в США, в том числе среди студентов химико-технологических специальностей. Пакет Aspen Plus используется для разработки технологии и аппаратурного оформления процессов, оптимизации работы установок в химической, нефтехимической промышленности. Являясь высокопроизводительными приложениями для ПК данных продукты не нашли широкого распространения на территории Казахстана.

Представленные в литературе [7-15] математические модели не учитывают групповые характеристики сырья, реакционную способность углеводородов, прямые и обратные реакции при изменении концентраций и температур, т.к. основаны на формировании псевдокомпонентов широкого фракционного состава.

Результаты и обсуждение. Авторами проведены расчеты по повышению ресурсоэффективности, энергосбережения процессов нефтепереработки (крекинг, риформинг, изомеризация) методом математического моделирования с увеличением глубины переработки нефти, учитывающие состав перерабатываемого сырья [16-18]. В результате исследования были получены охранные документы на компьютерные программы по расчету оптимальных условий процессов нефтепереработки [19,20]. Авторами исследования был подписан договор об опытно-промышленных испытаниях с одним крупным нефтеперерабатывающим предприятием.

В данной статье приведены результаты расчетов по оптимизации действующих установок каталитического крекинга, риформинга и изомеризации на реальных технологических условиях одного нефтеперерабатывающего предприятия. Результаты расчетов могут быть внедрены в производство.

Повышение эффективности работы установки каталитического крекинга

В качестве проведения оптимальных расчетов для процесса каталитического крекинга было выбрано два типа сырья различных по групповому составу.

Расчеты по улучшению выхода и качества получаемых нефтепродуктов выполнены с целью:

- увеличения выхода фракции жирного газа для сырья №2 с высоким соотношением насыщенных углеводородов к ароматическим углеводородам $C_{НУ}/C_{АУ} = 1,74$,

Таблица 1 – Компонентный состав установки каталитического крекинга для определения оптимальных расчетов

Характеристика	Содержание, % масс.	
	№1	№2
Насыщенные углеводороды	57,7	61,6
Ароматические углеводороды	39,7	35,4
Смолы	2,6	3,0
Соотношение насыщенных к ароматическим углеводородам $C_{ну}/C_{ар}$	1,45	1,74

максимальный выход составил 33,87 % масс. при температуре крекинга 525,3 °С (фактически 32,9 % масс. при температуре крекинга 527,1 °С);

- увеличения нагрузки по выходу кокса для поддержания теплового баланса реакторно-регенераторного блока и увеличения октанового числа по ИМ, поэтому для сырья №1 содержание кокса на катализаторе составило 0,49 % масс. и октановое число по ИМ 92,22 п., что соответствует 4,47 % масс. выходу по коксу. Следует отметить, что по данному сырью выход жирного газа составил 33,51 % масс. и бензиновая фракция 44,46 % масс., при температуре 529 °С;

- увеличения бензиновой фракции для сырья №2 связано с высоким содержанием соотношения аренов и смол $C_{ну}/C_{ар} = 1,74$, выход бензина составил 44,53 % масс. и октановое число по ИМ 91,4 п. при протекании реакций dealкилирования с высоким содержанием аренов. При этом содержание кокса на катализаторе составляет 0,65 % масс., что обеспечивает поддержание теплового баланса системы.

В области высоких температур крекинга с учетом перерабатываемого сырья и активности регенерированного катализатора во время проведения оптимизационных расчетов важно учесть скорость коксообразования на поверхности катализатора, снижение получения выхода газовых нефтепродуктов и фракции бензина. Поэтому в *таблице 2* представлены фактические и рекомендуемые значения технологического режима для увеличения выхода газообразных продуктов олефинового ряда, бензиновой фракции и снижения избыточного коксообразования.

Применение математической модели позволили выработать рекомендации по оптимальной температуре процесса. Так, для сырья №1 при рекомендуемой температуре крекинга 525 °С конверсия сырья была увеличена на 3,8 % и достигнуто значение 89,0 %. При этом выход содержания кокса на катализаторе составило 0,63 % масс., выход кокса 5,04 %, что является достаточным для обеспечения теплового баланса реакторно-регенераторного блока. При данном сырье выход газа олефинового ряда составил 35,22 % масс., что соответствует выходу ППФ – 25,64 % масс., ББФ – 34,64 % масс. В свою очередь выход бензиновой фракции снизился на 0,59 % масс., но октановое число по ИМ выросло на 1,0 п., данное увеличение связано с увеличением содержания аренов и изоалканов при протекании реакций изомеризации и крекинга, а также переноса водорода и dealкилирования 35,41.

Таблица 2 – Фактические и рекомендуемые параметры технологического режима и показатели процесса каталитического крекинга

Показатели	Сырье № 1		Сырье № 2	
	ФР-1	ОР-1	ФР-2	ОР-2
Основные параметры технологического режима				
Расход сырья, м ³ /ч	173,86		194,99	
Температура сырья, °С	302,51	260,1	288,23	325,0
Расход шлама, м ³ /ч	19,12	19,0	18,94	18,0
Соотношение катализатор: сырье, тн _{кат} / тн _{сырья}	9,17	8,1	9,27	6,5
Температура катализаторного потока после регенерации, °С	661,51		660,71	
Относительная активность катализатора после регенерации, %	85,0		84,0	
Температура процесса, °С	526,0	525,5	528,0	529,0
Показатели процесса крекинга (расчет по модели)				
Конверсия, %	85,2	89,0	84,3	88,8
Выход продуктов, % масс.:				
– жирный газ, в т.ч.	34,43	35,22	34,77	36,04
– ППФ	25,06	25,64	25,25	26,17
–ББФ	33,83	34,61	34,16	35,41
– бензиновая фракция	43,85	43,26	44,49	44,53
– фракция 195-340 °С	12,25	11,94	11,47	9,58
– фракция >340 °С	3,53	4,54	3,36	2,83
– кокс	5,36	5,04	5,94	6,11
Октановое число бензина (ИМ)	91,2	92,2	91,6	91
Содержание кокса на закоксованном катализаторе, % масс.	0,58	0,63	0,64	0,61

Организация температуры процесса на позиции 529 °С обеспечила выход жирного газа по расчетам 36,04 % масс., увеличение произошло на 1,27 % масс., выход ППФ – 26,17, ББФ – 35,41 % масс. При этом кратность циркуляции катализатора составила по отношению к сырью 8,9. При данной температуре также замечено повышение конверсии сырья на 4,5 %, выход бензиновой фракции увеличен незначительно на 0,04 % масс., однако октановое число снизилось на 0,6 п., что составило 91 п.

Таким образом, использование математической модели на физико-химической основе обеспечивает прогнозирование выхода и качества получаемых нефтепро-

дуктов в зависимости от технологических параметров работы лифт-реактора и состава сырья.

Оптимальные технологические условия работы установки каталитического риформинга

Для количественного описания скоростей протекания реакций механизмнеобходимо формализовать – выбрать список основных компонентов и реакций. Формализация механизма превращения углеводородов в процессериформинга совместно с агрегированием составов материальных потоков погомологическому ряду и реакционной способности компонентов позволяетзначительно упростить модель, сократить количество рассматриваемыхкомпонентов до 69, при этом сохраняя её физико-химическую сущность.

Агрегирование осуществляется на двух уровнях, по вкладу в процессповышения октанового числа и по количеству атомов углерода в молекуле, что является неоспоримым преимуществом над многочисленными другимиметодиками (например, по технологическим свойствам, гомологическому ряду, структурно-химической методики и т.д.).

Результаты анализа показали, что при термобарических условиях проведения промышленного процесса практически все рассматриваемые реакции с термодинамической точки зрения осуществимы, но термодинамика рассматривает только условия равновесия системы и ничего не говорит о скорости достижения этого равновесия. Даже те реакции, которые характеризуются значительным отрицательным изменением энергии Гиббса, без катализатора могут протекатьочень медленно. Поэтому наряду с термодинамическим анализом возможных стадий при формализации обобщенного механизма протекания реакций для всех катализаторов и кинетика химических превращений определяющим образом зависит от свойств применяемых катализаторов.

Был произведен анализ влияния состава сырья и технологических параметров на процесс риформинга. На основе данного исследования возможно рекомендовать следующие оптимальные параметры процесса:

- температура: 480 – 495 оС;
- давление: 2,05 – 2,15 МПа;
- расход сырья: 120 – 140 м³/час;

Математическая модель позволяет определить требуемые значения оптимальных технологических параметров, что позволяет повышать эффективность производства бензинов.

Повышение эффективности производства изомеризата

Определена эффективность различных технологии процесса изомеризации методом математического моделирования.

Для анализа эффективности различных технологии было взято 10 экспериментов с различными составами сырья и технологическими параметрами протекания процесса. Также был проведен сравнительный анализ трех различных технологических схем процесса изомеризации.

По схеме «за проход» показатель октанового числа в среднем составляет 80,5 пунктов. При работе установки изомеризации по данной схеме идет полное ис-

пользование водорода, однако прирост октанового числа минимальный. Установка изомеризации в данном исполнении проста и не требует значительных затрат при ее вводе в технологическую цепочку завода.

Расчеты, проводимые по схеме с рециклом по гексану и метилпентанам обеспечивают прирост октанового числа на 8-9 пунктов в сравнении со схемой «за проход». Данная схема подразумевает установку дополнительной колонны деизогексанизации после основных реакторов изомеризации.

Однако для увеличения глубины переработки непрореагировавших фракции нефтяного сырья, требуется более эффективная установка. Технология с рециклом по углеводородам C_5 - C_6 решает эту задачу. Так, прирост ОЧИ 18-24 пункта от ОЧИ нефтяного сырья.

Проведен анализ влияния углеводородного состава сырья и технологических параметров на качество продукта изомеризации. Содержание в сырье н-гексана порядка 40 % масс., 2,2-диметилбутана выше 3 % масс., 2,3-диметилбутана около 20 % масс., циклогексана больше 4 % масс., увеличивает ОЧИ продукта изомеризации, относительно других экспериментов.

На процесс изомеризации благоприятно влияет низкая температура, низкое давление. Важно найти параметры равновесия всей системы, т.к. реакции изомеризации экзотермичны. Благоприятные технологические условия протекания процесса изомеризации: температура: 120 - 130 оС; давление: 3,03-3,14 МПа.

Эффективным методом прогностического моделирования процессов переработки углеводородного сырья является метод математического моделирования. Математическая модель процесса каталитического крекинга позволяет рассчитывать в зависимости от состава перерабатываемого сырья, технологического режима работы реактора и активности катализатора:

1. Расход и выход продуктов с установки: жирный газ; нестабильный бензин; фракция 195 – 340 °С; фракция >340 °С; кокс;
2. Содержание ППФ и ББФ в жирном газе каталитического крекинга;
3. Групповой и углеводородный состав и октановое число бензиновой фракции;
4. Температуру крекинга с учетом технологического режима работы реактора и теплового эффекта химических реакций процесса.

Компьютерная моделирующая система процесса каталитического риформинга имеет высокую точность описания параметров технологических процессов, не требует высоких материальных затрат, учитывает влияние внешних факторов (изменение состава сырья, изменение требований к конечным продуктам) на показатели действующего производства. Для работы в программе требуются указать тип установки, технологические параметры, состав сырья и катализата.

Таким образом, математическая модель процесса каталитического риформинга позволяет решить большой спектр задач: от анализа данных, для текущей переработки сырья до прогнозирования энергоэффективной работы всей установки в целом.

Применяя математическую модель процесса каталитической изомеризации легких бензиновых фракции, можно определить:

1. влияние состава перерабатываемого сырья при заданных технологических условиях процесса;

2. влияние температуры на входе в реакторный блок изомеризации при заданном индивидуальном составе компонентов перерабатываемого сырья;

3. влияние давления на входе в реакторный блок изомеризации при заданном индивидуальном составе компонентов перерабатываемого сырья.

Выводы. Разработанные универсальные моделирующие программы могут быть использованы для повышения ресурсоэффективности установки каталитического крекинга, риформинга и изомеризации, а именно прогнозирования группового углеводородного состава потока после реактора (в двух последних процессах), выхода продуктов с установки, группового состава и октанового числа бензина, а также определения оптимального режима работы реактора.

Надо отметить, что на только одном НПЗ технологическая цепь включает несколько установок нефтегазопереработки, требующая систематического исследования в зависимости от постоянно изменяющихся параметров поступающего сырья на переработку. Результаты исследования и сформированная база данных станет фундаментом для казахстанских специалистов в области математического моделирования для дальнейших исследований в области нефтегазопереработки и нефтехимии. 

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Статистика по глобальному энергетическому переходу. [Электронный ресурс] – 2021. – URL: <https://energystats.enerdata.net/> (дата обращения: 12.12.2022). [Statistika po global'nomu energeticheskomu perekhodu. [Elektronnyj resurs] – 2021. – URL: <https://energystats.enerdata.net/> (data obrashcheniya: 12.12.2022).]
- 2 ПО для технического проектирования PRO/II | Анализ работы. [Электронный ресурс] – 2022. – URL: http://iom.invensys.com/RU/pages/SimSci_ProcessEngSuite_PROII.aspx, (дата обращения: 12.12.2022). [PO dlya tekhnicheskogo proektirovaniya PRO/II | Analiz raboty. [Elektronnyj resurs] – 2022. – URL: http://iom.invensys.com/RU/pages/SimSci_ProcessEngSuite_PROII.aspx, (data obrashcheniya: 12.12.2022).]
- 3 Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. – М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 496 с. [Chernyh I.V. SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernyh prilozhenij. – M.: Dialog-MIFI, 2003. – 496 s.]
- 4 Пейч Л.И., Точилин Д.А., Поллак Б.П. LabVIEW для новичков и специалистов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 384 с. [Pejch L.I., Tochilin D.A., Pollak B.P. LabVIEW dlya novichkov i specialistov. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2004. – 384 s.]
- 5 HYSYS. Process. Руководство пользователя. – Hyprotech. Версия 2.4.
- 6 Обзор семейства программных продуктов ХАЙСИС «Система технологического моделирования HYSYS». [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <http://www.aspentech.ru/RU/products/eng/hysys/> (дата обращения: 12.12.2022). [Obzor semejstva programmnyh produktov HAJISIS «Sistema tekhnologicheskogo modelirovaniya HYSYS». [Elektronnyj resurs]. – 2022. – URL: <http://www.aspentech.ru/RU/products/eng/hysys/> (data obrashcheniya: 12.12.2022)]
- 7 Nickell R., Mesu G., Liu Y., Meirer F., Weckhuysen B.M. American Fuel and Petrochemical Manufacturers. – AFPM - AFPM Annual Meeting, 2016. – P. 283-305.
- 8 Gerzeliev I.M., Dement'ev K.I., Khadzhiev S.N. Effect of Catalyst and Feedstock Modification with Ultrafine Molybdenum Disulfide Particles on the Performance Characteristics of Catalytic Cracking // Petrol Chem. – 2015. – № 55 (6). – P. 258-310.

- 9 Hou X., Qiu Y., Zhang X., Liu G. Analysis of reaction pathways for n-pentane cracking over zeolites to produce light olefins // *Chemical Engineering Journal*. – 2017. – N 307. – P. 372-381.
- 10 Chen S., Fan Y., Yan Z., Wang W., Liu X., Lu C. CFD optimization of feedstock injection angle in a FCC riser, *Chemical Engineering Science*. – 2016. – 153. – P. 58-74.
- 11 Awayssa O., Al-Yassir N., Aitani A., Al-Khattaf S. Modified HZSM-5 as FCC additive for enhancing light olefins yield from catalytic cracking of VGO // *Applied Catalysis A: General*. – 2014. – 477. – P.172–183.
- 12 Shabaniyan J., Chaouki J., Performance of a Catalytic Gas-Solid Fluidized Bed Reactor in the Presence of Interparticle Forces // *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. – 2016. – 14(1). – P.433-444.
- 13 Rahimi N., Moradi D., Sheibak M., Moosavi E., Karimzadeh R. The influence of modification methods on the catalytic cracking of LPG over lanthanum and phosphorus modified HZSM-5 catalysts // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2016. – N 234. – P. 215-223.
- 14 Guo-QiangChen , Zheng-Hong Luo. New insights into intraparticle transfer, particle kinetics, and gas–solid two-phase flow in polydisperse fluid catalytic cracking riser reactors under reaction conditions using multi-scale modeling // *Chemical Engineering Science*. – 2014. – N 109. – P. 38-52.
- 15 Zhang J., Wang Z., Jiang H., Chu J., Zhou J., Shao S. Modeling fluid catalytic cracking risers with special pseudo-components // *Chemical Engineering Science*. – 2013. – N 102. P. 87-98.
- 16 Sejtenova G., Chuzlov V.A., Ivanchina E.D., Dolganov I.M. The Branched C5 - C6 Hydrocarbons Synthesis on Pt – Catalyst // *Current organic synthesis*. - 2017. – Vol. 14. – P. 332-341.
- 17 Sejtenova G., Belinskaya N. Ivanchina S., Emiliya D.; Ivashkina E.N. Studying Patterns of Synthesis of Low Freezing Distillates from Atmospheric Gasoil by Means of Mathematical Modelling // *Current organic synthesis*. – 2017. – Vol. 14. – P. 365-371.
- 18 Дюсова Р.М., Бурумбаева Г.Р., Сейтенова Г.Ж., Иванчина Э.Д. Модернизация установки процесса каталитического крекинга // *Вестник КазНУ*. – 2018. – №6. – С. 314-319. [Dyusova R.M., Burumbaeva G.R., Sejtenova G.Zh., Ivanchina E.D. Modernizaciya ustanovki processa kataliticheskogo krekinga // *Vestnik KazNITU*. – 2018. – №6. – S. 314-319.]
- 19 А.с. № 4227 РК. Компьютерная программа расчета изомеризации по технологии «за проход» / Дюсова Р.М., Сейтенова Г.Ж., Бурумбаева Г.Р.Опубл. 25.06.2019. [A.s. № 4227 RK. Komp'yuternaya programma rascheta izomerizacii po tehnologii «za prohod» / Dyusova R.M., Sejtenova G.Zh., Burumbaeva G.R. Opubl. 25.06.2019.]
- 20 А.с. № 4215 РК. Компьютерная программа расчета процесса каталитического риформинга / Бурумбаева Г.Р., Сейтенова Г.Ж., Дюсова Р.М. Опубл. 25.06.2019. [A.s. № 4215 RK. Komp'yuternaya programma rascheta processa kataliticheskogo riforminga / Burumbaeva G.R., Sejtenova G.Zh., Dyusova R.M. Opubl. 25.06.2019.]