

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Э.Д. Иванчина, В.В. Дериглазов, И.К. Занин\*

Томский политехнический университет

\*ПО «Киришинефтеоргсинтез», г. Кириши

E-mail: deriglazoff@sibmail.com

*Показана технико-экономическая эффективность применения компьютерной моделирующей системы в совершенствовании режимов эксплуатации промышленной установки каталитического риформинга бензинов ЛЧ-35-11/1000. Программный продукт «Система контроля работы катализатора» использован для мониторинга каталитического риформинга. Показано, что работа на оптимальной активности позволяет увеличить выход товарного продукта при постоянстве уровня производственных издержек, а также получить оценку рабочего состояния поверхности Pt-Re катализатора.*

### **Ключевые слова:**

*Каталитический риформинг, мониторинг, математическое моделирование, тестирование, октановое число, эффективность, ресурсосбережение.*

### **Key words:**

*Catalytic reforming, monitoring, mathematical modeling, testing, octane number, efficiency, resource-saving.*

Нефтепереработка – важнейшая отрасль экономики страны, ее развитие относится к стратегическим задачам экономического роста государства. Оценка современного состояния российской нефтеперерабатывающей отрасли говорит о срочной необходимости ее модернизации: обновления оборудования, увеличения глубины переработки нефти, а также качества производимой продукции. Учитывая современные требования, предъявляемые к моторному топливу, а также потребность населения в нем, первоочередным этапом является совершенствование каталитического риформинга. На территории Российской Федерации и стран СНГ он является базовым для производства высокооктановых бензинов [1, 2].

Современные промышленные катализаторы риформинга представляют собой сложную систему на основе композиции  $[Pt+Re/Cl-Al_2O_3]$  и обеспечивают выход целевого продукта на уровне максимально близком к термодинамически возможному. Совершенствование катализаторов риформинга в последние десятилетия осуществляется за счет модифицирования носителя – оксида алюминия, а также путем подбора активных металлов. Данные разработки направлены на повышение селективности и стабильности работы катализатора риформинга. Показатель стабильности определяется продолжительностью межрегенерационного периода работы установок риформинга, который, в свою очередь, зависит от эксплуатационных режимов их работы. Как следствие, возникает необходимость организации эффективного контроля и оперативного управления каталитическим риформингом, что решается на современном уровне применением методов математического моделирования и компьютерных моделирующих систем. Создание и внедрение таких систем в нефтепереработку является актуальной технической задачей.

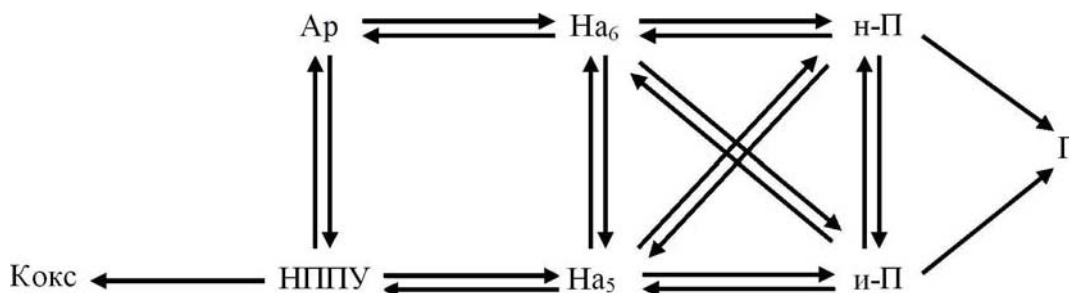
Основу любой моделирующей системы составляет математическая модель, полученная на осно-

ве корреляционных, статистических, формализованных технологических данных, либо физико-химических моделей.

Естественно, что наибольшей надежностью обладают модели, разработанные на основе механизма и кинетики превращения углеводородов на поверхности катализатора. На практике, к сожалению, очень часто используются формализованные математические модели, выполненные на основе статистической обработки фактической информации. Они не могут быть применены для прогнозирования промышленного процесса в динамике [3].

В качестве примера реализации такой методики можно назвать широко рекламируемые программы «PIMS», «СОКР», «БЕЛРИФ» и др. Такие системы применяют и на промышленных предприятиях. Система «СОКР» используется для описания работы секции 200 комплекса ЛК-6У Мозырского нефтеперерабатывающего завода. Но из [4] становится ясно, что данная система не обладает прогностической функцией, и в основе ее лежит статистическая модель процесса. Напротив, в компьютерной системе фирмы «Профиматикс» реализованы формализованные закономерности технологии, устанавливаемые по результатам испытаний с использованием математического оптимизатора. Вместе с тем, в ней не используется база данных по катализаторам и, соответственно, не осуществляется тестирование и выбор контакта, а также прогнозирование его технологических показателей в процессе промышленной эксплуатации [5].

Компьютерной моделирующей системой, способной решить вышеперечисленные задачи является «Система контроля работы катализатора», разработанная на кафедре химической технологии топлива и химической кибернетики Томского политехнического университета [6]. Она основана на нестационарной кинетической модели каталитического риформинга и учитывает как физико-



**Рис. 1.** Формализованная схема превращений для углеводородов  $C_8-C_{12}$ : Г – газ; н-П – нормальные парафины; и-П – изопарафины;  $Ha_6$  – циклогексаны;  $Ha_5$  – циклопентаны; Ар – ароматические углеводороды; НППУ – неопределенные промежуточные продукты уплотнения

химические закономерности превращения углеводородов на поверхности Pt–Re катализаторов, так и изменение состава перерабатываемого сырья.

На рис. 1 показано, что возможно существование равновесия реакции образования и гидрирования неопределенных промежуточных продуктов уплотнения, а значит, при определенных условиях образование кокса не происходит, т. к. его предшественник – смолы, асфальтены либо гидрируются до углеводородов, либо находятся в равновесии с газофазной реакционной средой. Таким образом, регулируя температуру ввода сырья в реактор, можно обеспечить такой режим ведения процесса, при котором будет существовать равновесие реакции образования коксогенных структур и их гидрирования. Но на практике это трудно реализовать, т. к. требуется получить конечный продукт заданного качества с высоким октановым числом, поэтому возникает объективная необходимость отклонения от термодинамического равновесия. В результате происходит накопление неопределенных продуктов уплотнения. Однако именно на этом противоречии основывается решение очень важной промышленной задачи – подбор нужного катализатора [7].

Математическая модель каталитического риформинга представляет собой систему уравнений материального и теплового балансов:

$$\begin{cases} G \left( \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial C_i}{\partial V} \right) = \sum_{j=1}^m W_j \\ G \left( \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial V} \right) = - \frac{1}{C_p^{см}} \sum_{j=1}^m Q_j \end{cases}$$

Начальные условия:  $z=0, C_i=0, T=0, V=0, C_i=C_{вх}, T=T_{вх}$ , где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го реагента на входе в реактор, моль/ $m^3$ ;  $T$  – температура;  $z$  – суммарный объем переработанного сырья,  $m^3$ ;  $W_j$  – скорость  $j$ -й реакции;  $V$  – объем катализатора,  $m^3$ ;  $G$  – объемный расход сырья,  $m^3/ч$ ;  $Q$  – тепловой эффект  $j$ -й реакции, Дж/моль;  $C_p^{см}$  – теплоемкость смеси, Дж/моль.

С использованием КМС выполнен мониторинг работы промышленной установки ЛЧ-35-11/1000. На основании полученных результатов была проведена оценка экономической эффективности применения данной программы для совершенствования каталитического риформинга бензинов.

Объектом проведенного исследования стала установка каталитического риформинга ЛЧ-35-11/1000 г. Кириши, Ленинградской области, где были загружены Pt-Re катализаторы RG-492 в первый реактор риформинга и RG-582 во второй и третий реакторы. Установка работает по бензиновому варианту, катализатор эксплуатируется с 1999 г.

В качестве исходных данных для расчета использованы результаты хроматографического анализа составов сырья и стабильного катализата – основного продукта процесса.

Мониторинг работы установки проводился в период с 26.11.2009 по 19.10.2010 гг., что охватывает практически весь восьмой сырьевой цикл эксплуатационного периода катализатора.

На рис. 2 отображено изменение текущей активности катализатора в течение восьмого сырьевого цикла.

Колебания активности катализатора в течение всего исследуемого периода связаны с изменениями норм технологического режима: загрузка установки сырьем, температура ввода сырья в реактор, кратность циркуляции водородсодержащего газа, а также с непостоянством углеводородного состава сырья. В целом, на протяжении восьмого цикла катализатор проявлял высокую стабильность и селективность. За 1 год работы установки ЛЧ-35-11/1000 без регенерации катализатора его активность снизилась в среднем на 0,2 отн. ед. Подъем активности катализатора в октябре месяце до 0,82 отн. ед. связан с изменением состава сырья, поступающего на переработку. На основе проведенных расчетов и построенной графической зависимости можно сделать вывод, что правильный подбор технологических параметров процесса и постоянный контроль углеводородного состава сырья позволят оптимизировать работу установки.

Технико-экономическими показателями работы катализаторов установок риформинга являются октановое число и выход стабильного катализата. Значение октанового числа стабильного катализата не может быть использовано как критерий технологического режима эксплуатации катализатора, т. к. этот показатель зависит от требований выпуска той или иной марки автомобильного бензина. При оптимизации процесса и оценки его экономической эффективности объективным критерием

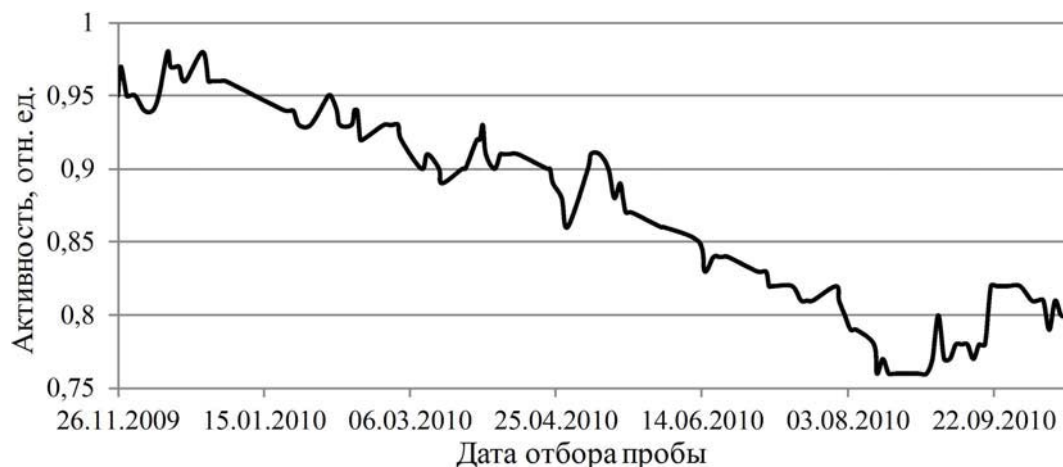


Рис. 2. Текущая активность катализатора установки ЛЧ-35-11/1000

служит степень использования потенциала катализатора, которая численно равно отклонению рабочей активности от оптимальной. Минимальное отклонение соответствует максимальному увеличению выхода основной калькулируемой продукции – стабильного катализата риформинга при заданном октановом числе за весь сырьевой цикл его работы. Подбор оптимальных технологических условий эксплуатации катализатора, обеспечивающих максимальную степень его использования, является многофакторной задачей и зависит, прежде всего, от реакционной способности углеводородов – компонентов сырья.

Для обеспечения оптимального режима в промышленных условиях необходимо поддерживать требуемое соотношение скоростей целевых и побочных реакций риформинга, а также сохранять равновесие реакций образования и гидрирования коксогенных структур, определяемого соотношением активных кислотных и металлических центров. Таким образом, использование моделирующей системы для мониторинга работы установки риформинга ЛЧ-35-11/1000 позволяет без существенных производственных затрат увеличить вы-

ход основной продукции и снизить ее себестоимость.

На рис. 3 приведено сравнение текущей и оптимальной активностей Pt-Re катализатора.

В течение восьмого сырьевого цикла значения текущей активности катализатора отличались от значений оптимальной активности. Таким образом, на протяжении этого времени селективность процесса в силу объективных производственных причин не всегда являлась оптимальной. Это нашло отражение на выходе основной продукции установки – стабильного катализата.

Для оценки экономической целесообразности необходимо рассчитать себестоимость 1 т готовой продукции при работе установки в текущем режиме и сравнить с себестоимостью 1 т продукции при работе установки в оптимальном режиме.

Согласно [8], при работе катализатора на оптимальной активности достигается наибольшая селективность процесса, а максимальная селективность соответствует максимальному выходу товарной продукции. Таким образом, результатом применения программного модуля «Система контроля работы катализатора» должно стать увеличение вы-

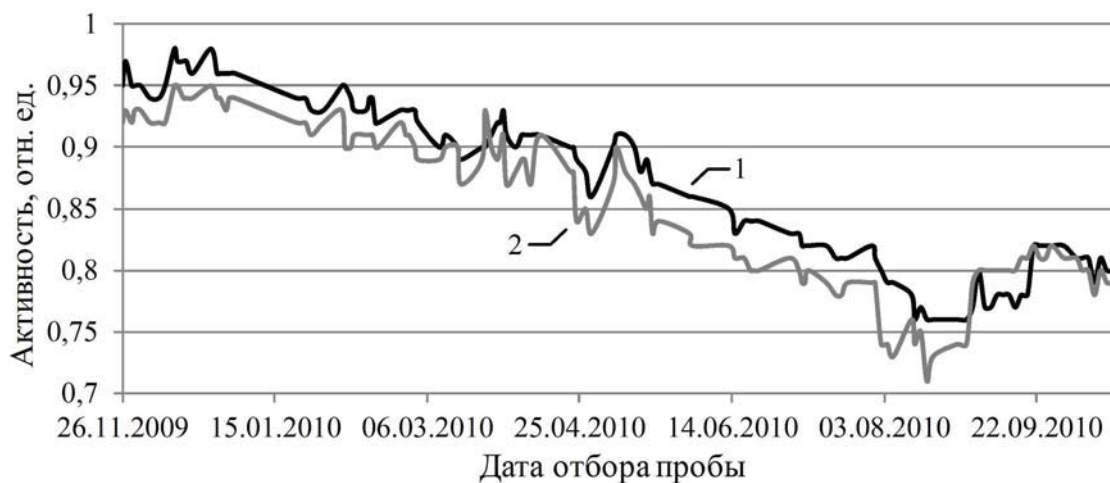


Рис. 3. Зависимость текущей (1) и оптимальной (2) активности катализатора от времени работы установки ЛЧ-35-11/1000

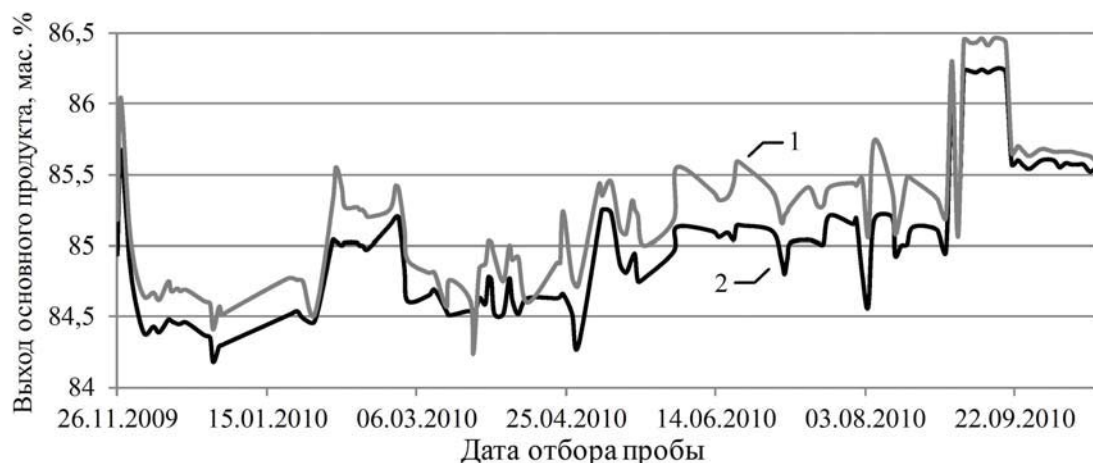


Рис. 4. Выход стабильного катализатора при текущей (1) и оптимальной (2) активности катализатора от времени работы установки ЛЧ-35-11/1000

хода стабильного катализатора при практически неизменном уровне издержек производства за счет максимально возможного приближения к равновесной степени превращения сырья в продукт.

При расчете приняты допущения:

- простой на текущий и капитальный ремонт – 55 сут/год;
- максимальная производительность оборудования – 170 м<sup>3</sup>/ч;
- цены на все виды ресурсов соответствуют IV кварталу 2010 г.

Основанные на результатах работы [9] расчеты сведены в таблице.

Таблица. Экономические показатели работы установки ЛЧ-35-11/1000 при оптимальной активности катализатора

Показатели	Номер цикла							
	1	2	3	4	5	6	7	8
П	1082280							
ΔА	0,10	0,23	0,19	0,10	0,12	0,09	0,01	0,02
ΔС	0,89	2,04	1,69	0,89	1,02	0,80	0,15	0,24
ΔП	8173,30	18798,60	15529,30	8173,30	9399,29	7355,97	1582,30	2875,50
ΔВ	83,78	192,70	159,19	83,78	96,35	75,41	16,21	29,43
ΔВ <sub>1</sub>	0,76	1,74	1,43	0,76	0,87	0,68	0,15	0,27

П – теоретическая производительность установки по сырью, т/год; ΔА – среднее отклонение рабочей активности от оптимальной активности за цикл (расчет на модели); ΔС – увеличение селективности процесса при работе на оптимальной активности катализатора, среднее за цикл, % (расчет на модели); ΔП – увеличение производительности по стабильному катализату при работе на оптимальной активности катализатора; ΔВ – экономическая эффективность работы установки на оптимальной активности, млн р.; ΔВ<sub>1</sub> – относительное увеличение экономической эффективности при работе установки на оптимальной активности, %.

На основании данных сравнительного расчета можно сделать вывод, что, чем больше отклонение уровня текущей активности от уровня оптимальной, тем меньше основной продукции может быть произведено. С учетом того, что колебания цен

на рынке нефтепереработки велики и носят непредсказуемый характер, полученные данные, ввиду принятых допущений, не могут служить точной характеристикой увеличения доходности. Однако из полученных результатов четко видна зависимость себестоимости продукта от режима ведения процесса.

Анализ приведенных в таблице данных свидетельствует о необходимости поддержания оптимального технологического режима. Причем на основании проведенных расчетов прослеживается тенденция стабилизации режима и уменьшения степени отклонения уровня текущей активности от уровня оптимальной активности от одного сырьевого цикла к другому.

#### Выводы

1. Для мониторинга каталитического риформинга бензинов использован авторский программный продукт «Система контроля работы катализатора».
2. Приведена оценка рабочего состояния поверхности Pt-Re катализатора. Активность в среднем за цикл снизилась на 0,2 отн. ед.
3. Экспериментально показано, что работа Pt-Re катализатора на оптимальной активности позволяет увеличить выход товарного продукта при постоянстве уровня производственных издержек. Среднее отклонение текущей активности от оптимальной за эксплуатационный период работы катализатора не превысило 0,02 отн. ед.
4. Дана оценка технико-экономической эффективности применения компьютерной моделирующей системы в совершенствовании режимов эксплуатации промышленной установки каталитического риформинга ЛЧ-35-11/1000.
5. Поддержание оптимального технологического режима работы установки ЛЧ-35-11/1000 способствует увеличению ее производительности по сырью на 2875 т в год, а также приносит дополнительную прибыль в размере 29,4 млн р. в год.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуплякин В.К. Современные проблемы российской нефтепереработки и отдельные задачи ее развития // Российский химический журнал. – 2007. – Т. 51. – № 4. – С. 11–12.
2. Нефедов Б.К. Углубленная переработка нефтяных остатков как стратегическое направление развития нефтеперерабатывающей промышленности России в 2010–2020 гг. // Катализ в промышленности. – 2010. – № 4. – С. 39–51.
3. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д. Компьютерное прогнозирование и оптимизация производства бензинов. Физико-химические и технологические основы. – Томск: STT, 2000. – 192 с.
4. Бабицкий С.Л., Смолин А.В., Рослик В.В., и др. Опыт промышленного применения моделирующего стенда каталитического риформинга бензинов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2004. – № 11. – С. 37–44.
5. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д. Компьютерное прогнозирование оптимальной эксплуатации промышленных установок риформинга. – Томск: Изд-во СО РАН, 1992. – 65 с.
6. Долганов И.М., Францина Е.В., Афанасьева Ю.И., Иванчина Э.Д., Кравцов А.В. Моделирование промышленных нефтехимических процессов с использованием объектно-ориентированного языка Delphi // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 57–61.
7. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Галушин С.А., Полуоборцев Д.С. Системный анализ и повышение эффективности нефтеперерабатывающих производств методом математического моделирования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 170 с.
8. Костенко А.В., Молотов К.В., Иванчина Э.Д., Кравцов А.В., Фалеев С.А., Абрамин А.Л. Разработка и применение технологических критериев оценки активности и стабильности Pt-катализаторов риформинга бензинов методом математического моделирования // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2007. – № 6. – С. 18–22.
9. Кравцов А.В., Иванчина Э.Д., Молотов К.В., Фалеев С.А., Шарова Е.С. Повышение эффективности реакционных процессов нефтепереработки методом математического моделирования // Труды IX Петербургского Международ. Форума ТЭК. – Санкт-Петербург, 25–27 марта 2009. – СПб.: Химиздат, 2009. – С. 198–201.

Поступила 08.06.2011 г.

УДК 66.01:004.422.8

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ЛИНЕЙНЫХ АЛКИЛБЕНЗОЛОВ

И.О. Долганова, Е.Н. Ивашкина, Э.Д. Иванчина

Томский политехнический университет  
E-mail: dolganovaio@sibmail.com

*Разработана компьютерная моделирующая система для процесса алкилирования бензола высшими олефинами. Предложен алгоритм поиска оптимальных технологических параметров с использованием разработанного программного продукта. Показана возможность применения методов математического моделирования к решению задач оптимизации взаимосвязанных процессов алкилирования и регенерации катализатора.*

### Ключевые слова:

*Математическая модель, алгоритм расчета, алкилирование, алкилбензол, критерий оптимальности.*

### Key words:

*Mathematical model, calculation algorithm, alkylation, alkylbenzene, optimality criterion.*

Программные комплексы, разработанные с использованием языков объектно-ориентированного программирования, могут применяться не только для создания автономного программного обеспечения, но также для мониторинга и прогнозирования режимов работы промышленных установок на предприятиях любого профиля. Химическая промышленность не является исключением.

В условиях многофакторной зависимости показателей эффективности промышленного процесса от технологических условий и состава перерабатываемого сырья при оптимизации химико-технологических процессов хорошо себя зарекомендовали методы математического моделирования и разработанные на их основе компьютерные моделирующие системы [1, 2]. В основе таких систем лежат физико-химические закономерности протекающих процессов.

Несмотря на наличие работ по математическому моделированию [3, 4], вопрос комплексной оптимизации работы промышленных установок остается нерешенным. Изменение технологического режима может привести к повышению эффективности работы одного реактора, но негативно сказаться на качестве продуктов, получаемых на последующих стадиях, и даже привести к сбою в работе установки. Поэтому чрезвычайно важно поддерживать наиболее выгодный технологический режим с точки зрения всех процессов химико-технологической системы.

Одним из перспективных направлений развития нефтеперерабатывающей промышленности является производство синтетических моющих средств, и, следовательно, линейных алкилбензолов (ЛАБ) как одного из видов сырья для их производства [5, 6]. При этом процесс алкилирования