

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2148>

**Б. Б. Оразбаев¹, *А. Т. Кишубаева², К. Н. Оразбаева³,
М. Д. Кабибуллин⁴, Л. М. Абдибекова⁵**

¹Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана;

²Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

^{3,5}Esil University, Республика Казахстан, г. Астана;

⁴Западно-Казахстанский университет имени М. Утемисова, Республика Казахстан, г. Уральск.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2109-6999>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1125-8696>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1741-7553>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3972-7894>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3690-3398>

*e-mail: Altynai_999@mail.ru

КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ МОДЕЛЕЙ ОСНОВНЫХ АГРЕГАТОВ УСТАНОВКИ ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Предложена концепция разработки системы моделей основных взаимосвязанных агрегатов технологических систем на примере установки замедленного коксования (УЗК) в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации. На основе предложенной концепции определены и разработаны эффективные модели основных агрегатов УЗК, в которых протекают процессы производства нефтяного кокса, бензина, легкого и тяжелого газойлей. Для оценки нечетких качественных показателей кокса синтезированы лингвистические модели на основе экспертных знаний в виде системы нечеткого вывода. Приведены и описаны этапы метода синтеза лингвистических моделей и нечеткого моделирования качественных показателей нефтяного кокса на основе модели Мамдани. Гибридные модели, описывающие процессы ректификации и замедленного коксования, интегрируют статистические, нечеткие и лингвистические модели, разрабатываемые на основе системы соответствующих методов. Преимущества разработанных

гибридных моделей основной ректификационной колонны и реакторов коксования УЗК на основе доступной статистической и нечеткой информации по сравнению с известными моделями заключаются в определении качества производимой продукции в нечеткой среде. Разработанные модели основных агрегатов УЗК на основе предложенного принципа объединения интегрированы в единую систему моделей УЗК, которая позволяет системно моделировать и оптимизировать процессы производства кокса и других нефтепродуктов.

Ключевые слова: установка замедленного коксования, нефтяной кокс, система моделей, нечеткая модель, гибридная модель, экспертные знания.

Введение

В настоящее время в нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) Казахстана и других нефтяных стран имеется тенденция роста доли тяжелых остатков нефтепереработки, таких как гудрон и мазут, которые необходимо перерабатывать. Ужесточение экологических требований, требования к увеличению глубины переработки нефти и объема получаемых светлых нефтепродуктов обосновывают необходимость широкого применения процессов глубокой нефтепереработки на установках замедленного коксования (УЗК). В этой связи, в настоящее время решение проблем повышения производительности УЗК и эффективного управления режимами ее работы на основе математических методов является актуальной научно-практической задачей нефтепереработки и обосновывает выбор темы данного исследования.

УЗК является сложной технологической системой, состоящей из взаимосвязанных теплообменников, печей, ректификационных и отпарных колонн, реакторов коксования и других агрегатов, в которых протекают процессы производства нефтяного кокса и других нефтепродуктов [1; 2]. Следовательно, для системного моделирования режимов работы УЗК с целью оптимизации ее режимов работы необходимо разработать систему взаимосвязанных моделей основных агрегатов УЗК, в которых протекают процессы производства кокса и других нефтепродуктов. Основной процесс, протекающий в УЗК, процесс замедленного коксования, протекает при высоких значениях температуры и давления, образованием качественного нефтяного кокса. Кроме нефтяного кокса, являющегося целевым продуктом, на УЗК производятся и другие нефтепродукты, такие как жирный газ, бензин, легкий и тяжелый газойли [3].

Технологический процесс замедленного коксования реализуется в условиях значительной нелинейности и неопределенности, из-за многокомпонентности, вариабельности состава сырья, нечеткого характера качественных показателей кокса (зольность, летучесть и др.) и шумов измерений. Эти показатели усложняют процессы разработки системы моделей основных агрегатов УЗК, оптимизации и управления процессом производства кокса и других нефтепродуктов.

Известные работы по моделированию УЗК преимущественно основаны на упрощенных балансовых моделях, которые ориентированы на стационарные режимы или на узкоспециализированные кинетические модели отдельных агрегатов установки. При этом не решенными остаются проблемы разработки системы взаимосвязанных моделей основных агрегатов УЗК, учитывающих совместное влияние различных параметров в условиях неопределенности и нечеткости и позволяющие оптимизировать режимы работы установки.

По результатам анализа существующих исследований по теме данной работы можно отметить, что проблемы разработки системы взаимосвязанных моделей основных агрегатов технологической системы в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации еще недостаточно исследованы и не решены на необходимом уровне. Приведем результаты литературного обзора по теме исследования.

Проблемы создания математических моделей сложных технологических объектов, объединяющих различные агрегаты, рассмотрены в исследованиях [4; 5; 6; 7]. В этих и других работах на основе теоретических исследований и на основе кинетики построены детерминированные модели типичных процессов, протекающих в технологических системах нефтепереработки и других производств. Преимуществом таких детерминированных моделей типичных процессов являются их универсальность, так как они основываются на фундаментальные законы как законы сохранения массы и энергии, но они описывают только типичные процессы в отдельных более простых агрегатах. Такие детерминированные модели не могут быть построены для сложных объектов, к каким относятся множества объектов реального производства, эксплуатируемые в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации.

Вопросы моделирования и управления режимами работы технологических систем в условиях стохастической неопределенности на основе их моделей исследованы в трудах [8; 9]. Управления сложными технологическими системами с использованием их моделей в зависимости от сложившейся ситуации на производстве исследованы в работе [10]. Однако

в этих и других исследованиях не учтены взаимосвязи и взаимодействия между собой агрегатов технологической системы, разрабатываемые модели отдельных агрегатов не объединяются в единую систему и не учитываются неопределенность нечеткого типа. Следовательно, полученные модели не позволяют системно моделировать и управлять исследуемыми технологическими системами в нечеткой среде.

В работах [11; 12; 13] предложены модели блоков технологической системы с учетом неопределенности частичной исходной информации, и на их основе рассмотрены подходы к управлению режимами работы блоков. Эти подходы, основанные на экспертной оценке и теории нечетких множеств, позволяют синтезировать нечеткие модели агрегатов с четкими и нечеткими выходными параметрами с использованием множества уровня α . Однако такие подходы не решают проблем синтеза лингвистических моделей объектов, когда и входные, режимные, и выходные параметры являются нечеткими. Для многих реальных объектов в различных ситуациях входные и выходные параметры описываются нечетко, что требует синтеза их лингвистических моделей. Кроме того, в этих работах также не исследованы и не решены проблемы разработки системы взаимосвязанных моделей сопряженных между собой основных агрегатов исследуемых технологических систем.

Подытоживая результаты анализа, можно ответить, что традиционные методы построения математических моделей технологических объектов (аналитические, экспериментально-статистические) и синтеза нечетких моделей объектов с неопределенными выходными параметрами были исследованы во многих и других известных работах. А методы синтеза лингвистических моделей для объектов с нечеткими входными и выходными параметрами еще недостаточно исследованы.

Кроме того, обоснованные подходы к синтезу гибридных моделей на основе доступной информации различного характера и объединения полученных моделей агрегатов различных типов в единую систему моделей для системного моделирования и оптимизации режимов работы технологических систем еще не предложены. Все это показывает важность темы данного исследования, целью которой является предложить обоснованную концепцию разработки системы моделей основных взаимосвязанных агрегатов технологических систем на примере УЗК. Разработка научно обоснованной концепции разработки системы взаимосвязанных моделей основных агрегатов УЗК в условиях неопределенности и нечеткости является весьма актуальной научно-практической задачей, решение которой позволяет

оптимизировать и эффективно управлять технологическим процессом замедленного коксования

Материалы и методы

Для сбора данных о режимах работы и параметрах объекта исследования – УЗК 21–10/6, для которой предлагается концепция разработки системы моделей основных ее агрегатов, используются следующие данные и материалы исследования:

- экспериментально-статистические данные о значения параметров, описывающие различные режимы работы УЗК, которые получены с режимных листов функционирования УЗК и активных экспериментов, проведенных по плану, составленного на основе метода математического планирования экспериментов [14];

- технологический регламент работы УЗК [3] и ее технологические схемы:

- экспертная информация, описывающая нечеткие качественные показатели кокса, которая получается и обрабатывается на основе автоматизированного метода Дельфи [15].

Для обработки экспериментально-статистических данных используются методы теории вероятностей и математической статистики [16; 17].

Суть предлагаемой концепции разработки системы моделей основных взаимосвязанных агрегатов технологических систем на примере УЗК заключается в реализации следующих этапов:

1. На основе системного анализа идентифицируются и описываются связи основных агрегатов УЗК, в которых протекают процессы замедленного коксования и производства других нефтепродуктов;

2. Определяется цель моделирования УЗК и ее основных агрегатов и виды моделей, которые могут быть разработаны для каждого агрегата УЗК;

3. Выбираются критерии, позволяющие оценить эффективность разработки конкретного вида моделей для каждого из основных агрегатов УЗК;

4. Проводится экспертная оценка эффективности разработки конкретных видов моделей определенных на этапе 2 на основе критериев оценки моделей, выбранных на предыдущем этапе;

5. Реализуется процесс обработки результатов экспертной оценки и принятия решений по выбору наиболее эффективного вида модели для каждого основного агрегата УЗК;

6. Разработать выбранные виды моделей для каждого основного агрегата УЗК на основе соответствующих методов в зависимости от доступности и характера используемой информации;

7. Определить принцип объединения разработанных моделей различных типов в единую систему моделей. На основе этого принципа объединить разработанные модели в единую систему моделей, позволяющей системно моделировать и оптимизировать режимы работы УЗК.

Результаты и обсуждение

На основе предложенной в предыдущем разделе концепции разработки системы моделей разработаны эффективные виды моделей печей подогрева, реакторов коксования и основной ректификационной колонны УЗК, в которых реализуются процессы производства качественного кокса и других нефтепродуктов. Затем разработанные модели интегрировать в единую систему моделей, позволяющей системно моделировать, оптимизировать и управлять режимами работы УЗК.

Приведем полученные результаты в соответствии с описанными этапами предложенной концепции разработки системы моделей основных взаимосвязанных агрегатов УЗК.

1. В качестве основных агрегатов УЗК, в которых протекают процессы замедленного коксования и производства газа, бензина, легкого и тяжелого газойлей определены печи нагрева первичного и вторичного сырья; основная ректификационная колонна и реакторы коксования. При этом печи первичного нагрева нагревают сырье до 390–400 °С, которое поступает в куб основной ректификационной колонны К-1, где в зависимости от температуры кипения фракционируются на газы, легкий, тяжелый газойли. С низа данной колонны тяжелые остатки в качестве вторичного сырья подаются в печи вторичного нагрева П-2, П-3, откуда нагретое до температуры 490–510°С вторичное сырье поступает в ректоры коксования для производства кокса.

2. Целью моделирования перечисленных основных агрегатов УЗК является системное моделирование установки, определение их оптимальных значений режимных параметров, используемых в качестве управляющих воздействий. Основными возможными видами разрабатываемых моделей для основных агрегатов УЗК определены: статистические; нечеткие/лингвистические; гибридные модели;

3. Критериями, оценивающими эффективность разработки конкретного вида моделей для основных агрегатов УЗК выбраны:

- наличие или доступность необходимой информации для разрабатываемого вида модели;
- стоимость разработки модели выбранного типа;
- адекватность разработанной модели;

– удобства интегрирования разрабатываемого вида модели в единую систему моделей, позволяющей системно моделировать и оптимизировать режимов работы УЗК.

4. Проведена экспертная оценка эффективности разработки конкретных видов моделей определенных на этапе 2 на основе критериев оценки моделей, выбранных на предыдущем этапе.

5. Результаты обработки экспертной оценки, полученных на четвертом туре экспертизы приведены в ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты системного анализа и экспертной оценки и выбора эффективного вида моделей для основных агрегатов УЗК

Основные агрегаты УЗК	Критерии оценки и выбора вида моделей	Виды моделей		
		Статистические	Нечеткие / лингвистические	Гибридные
Печи нагрева вторичного П-3, П-4 сырья	1. Доступность необходимой информации	5	3	4,5
	2. Стоимость разработки	4	4	3,5
	3. Адекватность	4	3,5	4,5
	4. Интегрированность в систему моделей	4,5	4	3,5
<i>Интегрированный критерий</i>		16,5	14,5	16
Основная ректификационная колонна К-1	1. Доступность необходимой информации	3	4	4
	2. Стоимость разработки	3,5	4	4
	3. Адекватность	4	4	5
	4. Интегрированность в систему моделей	4	4	4
<i>Интегрированный критерий</i>		14,5	16	17
Ректоры коксования Р-1÷Р-4	1. Доступность необходимой информации	3,5	4	4
	2. Стоимость разработки	4	4	3,5
	3. Адекватность	3,5	3,5	5
	4. Интегрированность в систему моделей	4	4	4
<i>Интегрированный критерий</i>		15	15,5	16,5
Примечание: Оценка (ранжирование) проведена по 5-балльной шкале, где 1– минимальная, а 5– максимальная оценка				

На основе полученных результатов обработки экспертной оценки при обеспечении согласованности мнений экспертов, приведенных в таблице 1, принято решение по выбору эффективных видов моделей агрегатов УЗК. Эффективный вид модели, разрабатываемой для каждого агрегата, определяется максимальным значением интегрированного критерия.

Таким образом для печей нагрева вторичного сырья П-2, П-3, для которых доступна статистическая информация эффективным является разработка статистических моделей. Для основной ректификационной колонны К-1 и реакторов коксования Р-1÷Р-4, в которых протекают сложные, нелинейные процессы производства бензина, лёгкого и тяжелого газойлей, а также нефтяного кокса с нечеткими качественными показателями эффективными являются гибридные модели. При этом гибридные модели этих сложных агрегатов разрабатываются на основе доступной информации различного характера, например статистических данных и экспертных знаний, формализованных в виде нечеткой информации.

6. Для основных взаимосвязанных агрегатов УЗК разработаны выбранные на предыдущем этапе виды моделей для каждого основного агрегата УЗК на основе соответствующих методов в зависимости от доступности и характера используемой информации.

1. Статистические модели печей нагрева. Печи нагрева представляют собой трубчатые печи для нагрева первичного и вторичного сырья для коксования до температуры, требуемой технологическим режимом. Объем и качество продукции УЗК, во многом зависят от режима работы этих печей. Оптимизация режимов работы печей нагрева осуществляется с использованием их математических моделей, которые позволяют определять выходные характеристики печей в зависимости от входных переменных, то есть получать информацию о тепловом режиме работы печей.

Для расчета продуктов реакции в нагревательных печах структура их моделей на основе идеи подхода последовательного включения регрессоров идентифицирована в виде регрессионных уравнений. При этом предполагается, что закон распределения случайных измерений является приближением к нормальному закону, т.е.:

$$M[\varepsilon_j] = 0, \quad D[\varepsilon_j] = \sigma^2 = \text{const}, \quad j = \overline{1, m}.$$

Тогда регрессионных моделей, с требуемой точностью определить выходные параметры печей нагрева вторичного сырья, можно записать в виде:

$$y_j = a_{0j} + a_{1j}x_1 + a_{2j}x_2 + a_{3j}x_3 + a_{4j}x_1x_3 + \varepsilon_j, \quad j = \overline{1, m} \quad (1)$$

где $a_{ij}, i = \overline{0, 4}, j = \overline{1, 4}$ – неизвестные параметры моделей (1), которые идентифицируются на основе массива статистических данных о

значениях входных $x_i, i = 1, 3$, и соответствующих к ним выходных $y_j, j = 1, 2$ параметров печей с использованием метода наименьших квадратов.

При параметрической идентификации модели (1), описывающей состав продуктов реакции печей нагрева вторичного сырья (П-2, П-3), на основе массива статистических данных пакета программ REGRESS получены следующие результаты:

$$y_1 = 67,462 + 0,816x_1 - 0,386x_2 + 1,502x_3 + 0,05x_1x_3, \quad (2)$$

$$y_2 = 165,665 + 0,082x_1 - 0,359x_2 - 0,026x_3 + 0,386x_1x_2, \quad (3)$$

где y_1 – объем выходного потока (вторичное сырье); y_2 – температура вторичного сырья с выхода печей нагрева; x_1 – температура на входе печей; x_2 – давление печи; x_3 – объем входного потока (сырья) печи.

2. Гибридные модели основной ректификационной колонны К-1 УЗК. Гибридные модели основной ректификационной колонны К-1 УЗК разработаны на основе доступной статистической и нечеткой информации и использованием экспериментально-статистического метода и метода синтеза нечетких моделей [18].

Приведем результаты разработки гибридных моделей основной ректификационной колонны К-1 УЗК. На основе системного анализа и экспертной оценки были выбраны следующие входные, режимные параметры $x_1, \dots, x_5$, влияющие на объемы и качества продуктов разделения $y_1, \dots, y_5$ и $\tilde{y}_6, \tilde{y}_7, \tilde{y}_8$, необходимые для оптимизации процесса ректификации:

x_1 – объем первичного сырья, подаваемого в колонну К-1;

x_2 – объем острого орошения;

x_3 – объем циркулирующей воды;

x_4 – температура верха колонны К-1;

x_5 – температура вывода легкого газойля;

y_1 – объем газа с выхода колонны К-1;

y_2 – объем бензина с выхода колонны К-1;

y_3 – объем легкого газойля с выхода колонны К-1;

y_4 – объем тяжелого газойля с выхода колонны К-1;

y_5 – объем остатка, т. е. вторичного сырья с выхода колонны К-1;

$\tilde{y}_6$ – качество бензина коксования;

$\tilde{y}_7$ – качество легкого газойля;

$\tilde{y}_8$ – качество тяжелого газойля.

Последние 3, выходные параметры $\tilde{y}_6, \tilde{y}_7, \tilde{y}_8$, оценивающие качества бензина, легкого и тяжелого газойлей, на основе действующих стандартов

описываются нечеткими инструкциями. В этой связи для определения объемов нефтепродуктов с выхода основной ректификационной колонны разрабатываются полиномиальные модели регрессионного типа. А для оценки нечетких качественных показателей бензина, легкого и тяжелого газойлей с выхода колонны К-1 синтезируются нечеткие модели. Таким образом в состав гибридных моделей основной ректификационной колонны входят статистические и нечеткие модели, определяющие соответственно объемы и качества продуктов, вырабатываемых с данной колонны.

Структура статистических моделей определения объемов газа, бензина, легкого и тяжелого газойлей идентифицированы на основе идеи подхода последовательного включения регрессоров, которую в общем виде можно записать в виде:

$$y_j = a_{0j} + \sum_{i=1}^5 a_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^5 a_{ikj}x_{ij}x_{kj}, j = \overline{1,5}, \quad (4)$$

где $y_j, j = \overline{1,5}$ – соответственно объемы газа, бензина, легкого газойля, тяжелого газойля и вторичного сырья с выхода основной ректификационной колонны К-1; x_{ij} – описанные выше входные, режимные параметры, влияющие на объемы вырабатываемой продукции.

Неизвестные параметры $a_{0j}, a_{ij}, a_{ikj}, j = \overline{1,5}, i = \overline{1,5}, k=i$ идентифицируются на основе статистических данных с помощью программы REGRESS в котором реализован метод наименьших квадратов.

В результате параметрической идентификации получены следующие модели, определяющие объемы газа, бензина, легкого и тяжелого газойлей в зависимости от .

$$\begin{aligned} y_1 = & -32.8045 + 0.4062x_1 + 0.3018x_2 + 0.1132x_3 + 0.0841x_4 - \\ & -0.0854x_5 - 0.0010x_1^2 + 0.0008x_2^2 - 0.0015x_3^2 - 0.0005x_4^2 + \quad (5) \\ & +0.0001x_5^2 - 0.0055x_2 - 0.0005x_1x_3 + 0.0001x_1x_4 + 0.0007x_1x_5; \\ y_2 = & 11.8464 + 0.6252x_1 + 0.8417x_2 - 0.4340x_3 - 0.5610x_4 + \\ & +0.1949x_5 - 0.0032x_1^2 - 0.0021x_2^2 + 0.0007x_3^2 - 0.0056x_4^2 + \quad (6) \\ & +0.0013x_5^2 - 0.0021x_1x_2 + 0.0023x_1x_3 + 0.0002x_1x_4 + 0.0009x_1x_5; \\ y_3 = & 54.9989 + 1.5328x_1 + 1.9909x_2 - 0.8323x_3 - 1.5115x_4 + \\ & +0.3663x_5 - 0.0077x_1^2 + 0.0052x_2^2 - 0.0006x_3^2 - 0.0019x_4^2 + \quad (7) \\ & +0.0020x_5^2 - 0.0187x_1x_2 - 0.0069x_1x_3 + 0.0059x_1x_4 - 0.0128x_1x_5; \\ y_4 = & -6.7889 - 1.0460x_1 - 3.1669x_2 + 0.9811x_3 + 1.8300x_4 - \\ & -1.0117x_5 - 0.0085x_1^2 + 0.0030x_2^2 - 0.0018x_3^2 + 0.0235x_4^2 + \quad (8) \\ & +0.0051x_5^2 + 0.0014x_1x_2 + 0.0095x_1x_3 - 0.0088x_1x_4 - 0.0032x_1x_5; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_5 = & 165.6646 + 0.0816x_1 - 0.3591x_2 - 0.0265x_3 - 0.3867x_4 - \\ & - 0.0502x_5 + 0.0022x_1^2 - 0.0018x_2^2 - 0.0012x_3^2 + 0.0003x_4^2 - (9) \\ & - 0.0001x_5^2 + 0.0042x_1x_2 + 0.0007x_1x_3 - 0.0004x_1x_4 + 0.0016x_1x_5; \end{aligned}$$

Структура нечетких моделей, оценивающих основные качественные показатели бензина, легкого и тяжелого газойлей, на основе модифицированного метода последовательного включения регрессоров, идентифицирована в виде нечетких полиномиальных уравнений регрессионного типа:

$$\tilde{y}_j = \tilde{a}_{0j} + \sum_{i=\bar{6}}^8 \tilde{a}_{ij}x_{ij} + \sum_{i=\bar{6}}^8 \sum_{k=\bar{6}}^8 \tilde{a}_{ikj}x_{ij}x_{kj}, j = \overline{6,8}, \quad (10)$$

где $\tilde{y}_j, j = \overline{6,8}$ – качественные показатели бензина, легкого и тяжелого газойлей: $\tilde{y}_6$ – конец кипения бензина; $\tilde{y}_7$ – конец кипения легкого газойля и $\tilde{y}_8$ – температура застывания тяжелого газойля; $a_{0j}, a_{ij}, a_{ikj}, j = \overline{1,5}, i = \overline{1,5}, k=i$ – нечеткие параметры.

Идентификация нечетких параметров нечетких моделей (10) производится на множествах уровня α с помощью метода наименьших квадратов. Затем идентифицированные значения нечетких параметров объединяются по формуле теории нечетких множеств:

$$\tilde{a}_{ij} = \bigvee_{\alpha \in [0.5,1]} a_{ij}^{\alpha} \quad \text{или} \quad \mu_{\tilde{a}_{ij}}(a_0) = \sup_{\alpha \in [0.5,1]} \min \{ \alpha, \mu_{a_{ij}^{\alpha}}(a_0) \},$$

где $a_0^{\alpha} = \{a_0 \mid \mu_{\tilde{a}_{ij}}(a_0) \geq \alpha\}$.

В результате получены следующие модели определения основных качественных показателей бензина (11), легкого (12) и тяжелого (13) газойлей, удобные для компьютерного моделирования:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_6 = & 118.2768 + 1.7771x_1 + 0.6103x_2 - 0.1763x_3 - 0.4338x_4 + \\ & + 0.1462x_5 - 0.0035x_1^2 - 0.0012x_2^2 - 0.0009x_3^2 - 0.0027x_4^2 - (11) \\ & - 0.0026x_5^2 - 0.0035x_1x_2 + 0.0005x_1x_3 - 0.0006x_1x_4 - 0.0009x_1x_5; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_7 = & 282.6065 + 4.0156x_1 + 0.2124x_2 - 2.0340x_3 - 0.7275x_4 - \\ & - 0.3966x_5 - 0.0126x_1^2 - 0.0071x_2^2 - 0.0039x_3^2 - 0.0516x_4^2 + (12) \\ & + 0.0003x_5^2 - 0.0083x_1x_2 + 0.0044x_1x_3 + 0.0038x_1x_4 + 0.0008x_1x_5; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_8 = & 11.5377 - 0.0209x_1 + 0.1040x_2 + 0.1114x_3 + 0.0845x_4 - \\ & - 0.0775x_5 - 0.0013x_1^2 + 0.0007x_2^2 + 0.0014x_3^2 + 0.0006x_4^2 + (13) \\ & + 0.0002x_5^2 - 0.0004x_1x_2 - 0.0021x_1x_3 - 0.0004x_1x_4 + 0.0003x_1x_5. \end{aligned}$$

2. Гибридные модели ректоров коксования. В соответствии с результатами экспертной оценки предложенной концепции для реакторов коксования разработаны гибридные модели, комбинирующие статистических

моделей, определяющих объемов продукции, и лингвистических моделей, оценивающих качественных показателей кокса в нечеткой среде.

На основе экспериментально-статистических данных и вышеописанной методики разработаны следующие статистические модели определения объемов продукции с выхода реакторов коксования.

Модель для определения объема нефтяного кокса с выхода реакторов коксования:

$$y_1 = -289.201 + 11.582x_1 + 8.715x_2 + 71.084x_3 - 0.985x_4 - \\ - 0.012x_5 + 0.015x_1^2 + 0.195x_2^2 + 0.005x_3^2 + 0.160x_1x_2 + (14) \\ + 1.500x_1x_3 + 0.045x_1x_5 + 1.223x_2x_3 - 0.135x_2x_4 - 0.033x_2x_5.$$

Модель для определения объема паров нефтепродуктов с выхода ректоров коксования:

$$y_2 = 157.16 + 8.72x_1 + 3.45x_2 - 28.09x_3 - 12.10x_5 + 0.10x_1^2 + \\ + 0.55x_2^2 - 0.16x_1^2 + 0.33x_1x_2 - 0.01x_2x_3 + 0.04x_1x_5. \quad (15)$$

В моделях (14), (15) x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – входные, режимные параметры реакторов коксования, влияющие на объемы и качества продукции с выхода реакторов коксования, соответственно: объем сырья, подаваемого в ректоры; температура на входе реакторов; давление в реакторах коксования; показатель коксования сырья и коэффициент рециркуляции.

Для оценки нечетко описываемых основных качественных показателей серы – летучести ($\tilde{y}_1$) и зольности ($\tilde{y}_2$) с использованием аппарата нечёткой логики по методике Мамдани синтезированы лингвистические модели в виде системы нечеткого правил. Для этого основные входные, режимные параметры, влияющие на качество серы: $\tilde{x}_1$ – объем сырья; $\tilde{x}_2$ – температура; $\tilde{x}_3$ – давление реакторов коксования фазсифицированы. Определены термы, нечетко описывающих нечеткие значения входных и выходных параметров, для которых построены с помощью приложения Fuzzy Logic Toolbox функции принадлежности гауссова типа.

Для нечеткого описания значений объема сырья выбраны термы: «Малый (МЛ)»; «Средний (СР)» «Большой (БШ)», для температуры – «Низкая (НЗ)», «Номинальная (НМ)», «Высокая (ВС)», а для давления – «Низкое (НЗ)»; «Среднее (СР)», «Высокое (ВС)».

Для нечеткого описания летучести использованы термы: «Низкая (ЛНЗ)»; «Средняя (ЛСР)» «Высокая (ЛВС)», а для зольности – «Низкая (ЗНЗ)»; «Средняя (ЗСР)» «Высокая (ЗВС)»

Тогда полная база из 27 нечётких правил (3^3):

При низкой температуре (= НЗ)

1. ЕСЛИ =МЛ = НЗ =НЗ $\rightarrow$ =ЛНЗ, =ЗСР
2. ЕСЛИ =МЛ = НЗ =СР $\rightarrow$ =ЛНЗ, =ЗСР
3. ЕСЛИ =МЛ = НЗ =ВС $\rightarrow$ =ЛСР, =ЗВС

4. ЕСЛИ = СР = НЗ = НЗ → =ЛВС, =ЗСР
5. ЕСЛИ = СР = НЗ = СР → =ЛВС, =ЗВС
6. ЕСЛИ = СР = НЗ = ВС → =ЛСР, =ЗВС
7. ЕСЛИ = БШ = НЗ = НЗ → =ЛВС, =ЗСР
8. ЕСЛИ = БШ = НЗ = СР → =ЛВС, =ЗВС
9. ЕСЛИ = БШ = НЗ = ВС → =ЛСР, =ЗВС

При номинальной температуре (= НМ)

10. ЕСЛИ = МЛ = НЗ = НЗ → =ЛСР, =ЗНЗ
11. ЕСЛИ = МЛ = НЗ = СР → =ЛСР, =ЗСР
12. ЕСЛИ = МЛ = НЗ = ВС → =ЛНЗ, =ЗСР
13. ЕСЛИ = СР = НЗ = НЗ → =ЛСР, =ЗСР
14. ЕСЛИ = СР = НЗ = СР → =ЛСР, =ЗСР
15. ЕСЛИ = СР = НЗ = ВС → =ЛНЗ, =ЗВС
16. ЕСЛИ = БШ = НЗ = НЗ → =ЛСР, =ЗСР
17. ЕСЛИ = БШ = НЗ = СР → =ЛСР, =ЗВС
18. ЕСЛИ = БШ = НЗ = ВС → =ЛНЗ, =ЗВС

При высокой температуре (= ВС)

19. ЕСЛИ = МЛ = ВС = НЗ → =ЛНЗ, =ЗНЗ
20. ЕСЛИ = МЛ = ВС = СР → =ЛНЗ, =ЗСР
21. ЕСЛИ = МЛ = ВС = ВС → =ЛНЗ, =ЗСР
22. ЕСЛИ = СР = ВС = НЗ → =ЛНЗ, =ЗНЗ
23. ЕСЛИ = СР = ВС = СР → =ЛНЗ, =ЗСР
24. ЕСЛИ = СР = ВС = ВС → =ЛНЗ, =ЗВС
25. ЕСЛИ = БШ = ВС = НЗ → =ЛСР, =ЗСР
26. ЕСЛИ = БШ = ВС = СР → =ЛНЗ, =ЗВС
27. ЕСЛИ = БШ = ВС = ВС → =ЛНЗ, =ЗВС

Обсуждая результаты анализа структуры лингвистических моделей, можно отметить, что летучесть будет максимальной при низкой температуре реакторов коксования и примет минимальные значения при высоком значении температуры. Также летучесть кокса возрастает в процессе увеличения объёма сырья в реакторы коксования и незначительно уменьшается при росте давления реакторов коксования.

Зольность нефтяного кокса повышается при увеличении давления реакторов и объёма сырья реакторов коксования и уменьшаться при высокой температуре реакторов коксования, а также при низком значении давления.

База нечётких правил сформирована на основе экспертных знаний с учетом следующих физико-химических предпосылок:

- повышение значения температуры приведет к уменьшению летучести кокса, т. е. к повышению его качества;
- увеличение температуры вызывает снижение зольности до оптимального значения, при этом также повышается качество кокса.
- высокое значение давления приведет к увеличению зольности кокса;
- при увеличении объёма сырья, возможно, ухудшается прогрев, что в свою очередь снижает качество кокса увеличивая его летучести.

Для синтеза лингвистических моделей и нечеткого моделирования качественных показателей нефтяного кокса на основе модели Мамдани необходимо реализовать следующие этапы:

Провести нормирования значения входных, режимных параметров, влияющие на нечеткие качественные показатели кокса;

Определить универсумы и термы, нечетко описывающих входные параметров УЗК и качественные показатели. Затем в Fuzzy Logic Toolbox построить функции принадлежности термов;

3. На основе экспертных знаний сформировать нечеткую базу правил в виде системы нечеткого вывода с учетом физико-химических предпосылок процесса замедленного коксования. Для каждого правила определить функции принадлежности:

4. Реализовать процедуру агрегирования нечетких правил

5. Реализовать процедуру дефазификации, например по методу центра тяжести:

6. Проверить и обеспечить адекватность модели

Синтезированные лингвистические модели учитывают нечеткости технологических параметров процесса производства кокса и экспертных знаний, а также позволяют прогнозировать качественные показатели кокса и применить модели в системах управления процессом замедленного коксования. Кроме того, в предложенном системном подходе за счет использования доступной информации различного характера разработанные модели являются более адекватными и эффективными, чем модели, разрабатываемые традиционными методами.

В соответствии с этапом 7 концепцией разработки системы моделей основных взаимосвязанных агрегатов технологических систем разработанные модели основных агрегатов объединены в единую систему моделей, позволяющей системно моделировать и оптимизировать режимы работы УЗК. При этом принцип объединения разработанных моделей основных агрегатов УЗК заключается в соблюдении хода протекания процесса замедленного коксования в основных агрегатах УЗК в соответствии

с технологической схемой УЗК. Схема объединения разработанных моделей основных взаимосвязанных агрегатов УЗК приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Схема объединения моделей основных взаимосвязанных агрегатов УЗК в единую систему моделей

Как видно из приведенного рисунка в системе моделей основных агрегатов УЗК результаты моделирования одной модели могут быть использованы в качестве исходных данных других моделей. Например, результаты моделирования печей нагрева первичного сырья используются как исходные данные для модели основной ректификационной колонны. А результаты моделирования этой колонны, определяющие вторичное сырье, используются как входные данные для модели печей нагрева вторичного сырья, а, в свою очередь результаты моделирования этих печей используются в качестве исходных данных для реакторов коксования. Часть результатов моделирования, определяющая объем пары нефтепродуктов используются как часть входных данных моделей основной ректификационной колонны.

Часть результатов моделирования основной ректификационной колонны и реакторов коксования выводятся в качестве окончательных результатов, определяющих объемы и качественные показатели кокса и других нефтепродуктов УЗК.

Таким образом разработанная система моделей УЗК позволяет системно моделировать и оптимизировать режимов работы УЗК в условиях неопределенности, а также оценить нечеткие качественные показатели нефтяного кокса и других нефтепродуктов.

Информацию о финансировании

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP23490206).

Выводы

В работе исследованы проблемы моделирования и оптимизации режимов работы сложных технологических систем состоящих из множества взаимосвязанных агрегатов и эксплуатируемых в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации. Для решения исследованных проблем предложена концепция разработки системы моделей основных взаимосвязанных агрегатов технологических систем в условиях неопределенности, основанная на системном подходе и использования доступной информации различного характера.

К основным результатам исследования, имеющим научную новизну и практической важности относятся:

- на основе методологии системного анализа и аппарата теории нечетких множеств предложена концепция разработки системы взаимосвязанных моделей основных агрегатов сложных технологических систем;
- с использованием предложенной концепции разработана система моделей печей нагрева, основной ректификационной колонны и коксовых камер УЗК, которые объединены в единую систему моделей;
- гибридные модели основной ректификационной колонны и реакторов коксования разработаны на основе экспериментально-статистических данных с УЗК Атырауского НПЗ и экспертных знаний;
- предложен и реализован принцип объединения разработанных моделей основных агрегатов УЗК в единую систему моделей.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке системы моделей комплекса агрегатов сложных технологических систем нефтеперерабатывающего, нефтехимического и другой отраслей производства. Дальнейшим направлением данного исследования является разработка эвристических методов решения задач принятия решений в нечеткой среде, которые на основе разработанной системы моделей УЗК позволяют эффективно управлять режимами работы УЗК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Гуревич, И. Л. Теория и практика замедленного коксования [Текст]. – Санкт-Петербург : БХВ, 2022. – 278 с.
- 2 Borodin, E. V., Zhirnov, B. S., Vedernikov, O. S., Kleymenov, A. V., Golovachev, V. A., Demin, A. M., Bessonov V. V. Optimization of the Delayed Coking Process for the Production of Premium Petroleum Cokes [Text] // Chem. and Technol of Fuels and Oils. – 2025. – № 1. – P. 12–28.

3 **Түлеуов, Ж. Н., Сулейменов, Е. Д.** Технологические регламент установки замедленного коксования УЗК 21–10/6 Атырауского нефтеперерабатывающего завода [Текст]. – Атырау : Изд-во Атырауского университета нефти и газа. – 2018. – 217 с.

4 **Кафаров, В. В., Дорохов, И. Н.** Системный анализ химико-технологических процессов. Основы стратегии [Текст]. – М. : Наука, 3-изд. – 2018. – 517 с.

5 **Mohaddecy, S. R., Zahedi, S., Sadighi, S., Bonyad, H.** Reactor modeling and simulation of catalytic reforming process [Text]. // Petroleum & Coal. – 2021. – Vol. 48(3). – P. 28–35.

6 **Sharikov, Yu. V., Petrov, P. A.** Universal model for catalytic reforming [Text]. // Chem. and Techn. of Fuels and Oils. – 2018. – Vol. 25(4). – P. 33–47.

7 **Åström, K. J.** Modeling of Complex Systems. In: Gong, W., Shi, L. (eds) Modeling, Control and Optimization of Complex Systems. [Text]. The International Series on Discrete Event Dynamic Systems, Springer, Boston, MA. – 2021. – Vol 14. – P. 19–24. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1139-7_2

8 **Pinheiro, C. C., Fernandes, J. L., Domingues, L.** Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation, and Control Industrial [Text]. // Engineering Chemistry Research. – 2018. – Vol. 51(1). – P. 1–29.

9 **Coleman, B., Babu, J.** Techniques of Model Based Control [Text]. – Upper Saddle River : Practice Hall PTr, 2018. – 576 p.

10 **Поспелов, Д. А.** Ситуационное управление : теория и практика [Текст]. – М.: Наука, 3-е изд., 2018. – 305 с.

11 **Dzhambekov, A. M., Fyodorova, O. V.** Optimal control of the process of catalytic reforming of petrol fraction [Text]. // Bulletin of the Astrakhan State Tech. University Ser. control, computing tech. inform. – 2018. – Vol. 329(2). – P. 34–42.

12 **Keller, T., Gorak, A.** Modelling of homogeneously catalysed reactive distillation processes in packed columns : Experimental model validation [Text]. // Comput. Chem. Eng. – 2019. – Vol. 48. – P. 74–93.

13 **Алиев, Р. А. Церковный, А. Э., Мамедова, Г. А.** Управление производством при нечеткой исходной информации [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 253 с.

14 **Kvasman, N. M., Kamenetskii, Y. L., Shapovalov, V. S.** Mathematical methods of experiment design for determining the optimum production parameters for magnesite – Spinel roof brick [Text]. // Refractories. – 2023. – Vol. 16. – P. 84–89.

15 **Ismail, G., Taliep, N.** The Delphi Method. [Text] // In: Liamputtong, P. (eds) Handbook of Social Sciences and Global Public Health. – Springer, Cham, 2023. – P. 985–1003. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25110-8_66

16 **Bronshtein, I. N., Semendyayev, K. A., Musiol, G., Muehlig, H.** Probability Theory and Mathematical Statistics. [Text]. In: Handbook of Mathematics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2024. – P. 743–794. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05382-9_16

17 **Klonecki, W. K., Rosiński, A. J.** Mathematical Statistics and Probability Theory [Text] // New York, Springer, 2022. – 208 p.

18 **Orazbayev, B., Kuzhuhanova, Z., Orazbayeva, K., Uskenbayeva, G., Abdugulova, Z., Zhumadillayeva, A.** Hybrid Models of Atmospheric Block Columns of Primary Oil Refining Unit Under Conditions of Initial Information Deficiency [Text]. // Energies. – 2025. – Vol. 18(271). – P. 1–25. – <https://doi.org/10.3390/en18020271>

REFERENCES

1 **Gurevich, I. L.** Teoriya i praktika zamedlennogo koksovaniya [Theory and practice of delayed coking] [Text] // St. Petersburg : BHV, 2022. – 278 p.

2 **Borodin, E. V., Zhirnov, B. S., Vedernikov, O. S., Kleymenov, A. V., Golovachev, V. A., Demin, A. M., Bessonov V. V.** Optimization of the Delayed Coking Process for the Production of Premium Petroleum Cokes [Text] // Chem. and Techn. of Fuels and Oils, 2025. – № 1. – P. 12–28.

3 **Tuleuov, Z. N., Suleymenov, Y. D.** Tekhnologicheskkiye reglament ustanovki zamedlennogo koksovaniya UZK 21–10/6 Atyrauskogo neftepererabatyvayushchego zavoda [Echnological regulations of the delayed coking unit UZK 21–10/6 of the Atyrau Oil Refinery] [Text]. – Atyrau : Publishing house of the Atyrau University of Oil and Gas, 2018. – 217 p.

4 **Kafarov, V. V., Dorokhov, I. N.** Sistemnyy analiz khimiko-tekhnologicheskikh protsessov. Osnovy strategii [Systems analysis of chemical-technological processes. Fundamentals of strategy] [Text]. – M. : Nauka, 3rd ed., 2018. – 517 p.

5 **Mohaddecy, S. R., Zahedi, S., Sadighi, S., Bonyad, H.** Reactor modeling and simulation of catalytic reforming process [Text] // Petroleum & Coal. – 2021. – Vol. 48(3). – P. 28–35.

6 **Sharikov, Yu. V., Petrov, P. A.** Universal model for catalytic reforming [Text] // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 25(4). – P. 33–47.

7 **Åström, K. J.** Modeling of Complex Systems. In: Gong, W., Shi, L. (eds) Modeling, Control and Optimization of Complex Systems. [Text] // The International Series on Discrete Event Dynamic Systems, Springer, Boston, MA, 2021. – Vol. 14. – P. 19–24. – https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1139-7_2

8 **Pinheiro, C. C., Fernandes, J. L., Domingues, L.** Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation, and Control Industrial [Text]. // Engineering Chemistry Research. – 2018. – Vol. 51(1). – P. 1–29.

9 **Coleman, B., Babu, J.** Techniques of Model Based Control [Text] // Upper Saddle River: Practice Hall PTR, 2018. – 576 p.

10 **Pospelov, D. A.** Situatsionnoye upravleniye: teoriya i praktika [Situational management: theory and practice] [Text]. – M. : Nauka, 3rd ed., 2018. – 305 p.

11 **Dzhambekov, A. M., Fyodorova, O. V.** Optimal control of the process of catalytic reforming of petrol fraction [Text] // Bulletin of the Astrakhan State Tech. University Ser. control, computing tech. inform. – 2018. – Vol. 329(2). – P.34–42.

12 **Keller, T., Gorak, A.** Modelling of homogeneously catalysed reactive distillation processes in packed columns: Experimental model validation [Text] // Comput. Chem. Eng. – 2019. – Vol. 48. – P. 74–93.

13 **Aliyev, R. A. Tserkovnyy, A. E., Mamedova, G. A.** Upravleniye proizvodstvom pri nechtoy iskhodnoy informatsiyey [Production management with fuzzy initial information]. – М. : Energoatomizdat. 2nd ed., 2018. – 253 p.

14 **Kvasman, N. M., Kamenetskii, Y. L., Shapovalov, V. S.** Mathematical methods of experiment design for determining the optimum production parameters for magnesite – Spinel roof brick [Text] // Refractories. – 2023. – Vol. 16. – P. 84–89.

15 **Ismail, G., Taliep, N.** The Delphi Method. [Text] // In: Liamputtong, P. (eds) Handbook of Social Sciences and Global Public Health. Springer, Cham., 2023. – P. 985–1003. – https://doi.org/10.1007/978-3-031-25110-8_66

16. **Bronshtein, I. N., Semendiyayev, K. A., Musiol, G., Muehlig, H.** Probability Theory and Mathematical Statistics. [Text] // In Handbook of Mathematics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2024. – P. 743–794. – https://doi.org/10.1007/978-3-662-05382-9_16

17 **Klonecki, W. K., Rosiński, A. J.** Mathematical Statistics and Probability Theory [Text]. New York, Springer, 2022. – 208 p.

18 **Orazbayev, B., Kuzhuhanova, Z., Orazbayeva, K., Uskenbayeva, G., Abdugulova, Z., Zhumadillayeva, A.** Hybrid Models of Atmospheric Block Columns of Primary Oil Refining Unit Under Conditions of Initial Information Deficiency [Text] // Energies. – 2025. – Vol. 18(271). – P. 1–25. – <https://doi.org/10.3390/en18020271>

Поступило в редакцию 01.04.26.

Поступило с исправлениями 23.04.26.

Принято в печать 29.05.26.

*Б. Б. Оразбаев¹, *А. Т. Кишубаева², К. Н. Оразбаева³,
М. Д. Кабибуллин⁴, Л. М. Абдибекова⁵*

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

^{3,5}Esil University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

⁴М. Өтемісов атындағы Батыс Қазақстан университеті,
Қазақстан Республикасы, Орал қ.

01.04.26 ж. баспаға түсті.

23.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

29.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

АНЫҚСЫЗДЫҚ ЖАҒДАЙЫНДА БАЯУ КОКСТЕУ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ НЕГІЗГІ АГРЕГАТТАРЫНЫҢ МОДЕЛЬДЕР ЖҮЙЕСІН ҚҰРУ КОНЦЕПЦИЯСЫ

Технологиялық жүйелердің өзара байланысқан негізгі агрегаттарының модельдер жүйесін құру концепциясы анықсыздық және бастапқы ақпараттың айқын еместігі жағдайында баяу кокстеу қондырғысы (БҚК) мысалында ұсынылған. Ұсынылған концепция негізінде мұнай коксын, бензинді, жеңіл және ауыр газойльдерді өндіру процестері жүретін БҚК негізгі агрегаттарының тиімді модельдері анықталып, құрылған. Кокс сапасының айқын емес көрсеткіштерін бағалау үшін expertтік білімдерге негізделген лингвистикалық модельдер айқын емес қорытындылау жүйесі түрінде синтезделді. Мамдани моделіне негізделген мұнай коксының сапа көрсеткіштерін лингвистикалық модельдерді синтездеу және айқын емес модельдеу тәсілінің кезеңдері келтіріліп, сипатталған. Ректификациялау және баяу кокстеу процестерін сипаттайтын гибриді модельдер сәйкес тәсілдер жүйесі негізінде құрылған статистикалық, айқын емес және лингвистикалық модельдерді біріктіреді. Қолжетімді статистикалық және айқын емес ақпаратқа негізінде құрылған БҚК негізгі ректификациондық колоннасы мен кокстеу реакторларының гибриді модельдерінің белгілі модельдермен салыстырғандағы артықшылығы – өндірілген өнімдердің сапасын айқын емес ортада анықтауында. Ұсынылған біріктіру принципіне негізделген БҚК негізгі агрегаттарының құрылған модельдері БҚК бірыңғай модельдер жүйесіне біріктірілген, бұл кокс және басқа да мұнай өнімдерін өндіру процестерін жүйелі модельдеуге және оптимизациялауға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: баяу кокстеу қондырғысы, мұнай коксы, модельдер жүйесі, айқын емес модель, гибриді модель, сараптамалық білім.

*B. B. Orazbayev¹, *A. T. Kishubayeva², K. N. Orazbayeva³,
M. D. Kabibullin⁴, L. M. Abdibekova⁵*

¹L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana;

²Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

^{3,5}Esil University, Republic of Kazakhstan, Astana;

⁴M. Utemisov West Kazakhstan University,
Republic of Kazakhstan, Uralsk.

Received 01.04.26.

Received in revised form 23.04.26.

Accepted for publication 29.05.26.

CONCEPT OF DEVELOPING SYSTEM OF MODELS OF MAIN COMPONENTS OF DELAYED COKING UNIT UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

A concept for developing a system of models of the main interconnected units of technological systems is proposed using the example of a delayed coking unit (DCU) under conditions of uncertainty and fuzzy initial information. Based on the proposed concept, effective models of the main units of the ultrasonic treatment plant, in which the processes of production of petroleum coke, gasoline, light and heavy gas oils take place, have been defined and developed. To evaluate fuzzy quality indicators of coke, linguistic models based on expert knowledge were synthesized in the form of a fuzzy inference system. The stages of the method for synthesizing linguistic models and fuzzy modeling of quality indicators of petroleum coke based on the Mamdani model are presented and described. Hybrid models describing the processes of rectification and delayed coking integrate statistical, fuzzy and linguistic models, developed on the basis of a system of corresponding methods. The advantages of the developed hybrid models of the main distillation column and coking reactors of the ultrasonic complex based on available statistical and fuzzy information compared to known models is the determination of the quality of manufactured products in a fuzzy environment. The developed models of the main units of the ultrasonic scanning unit, based on the proposed principle of unification, are integrated into a single system of ultrasonic scanning units, which allows for the systematic modeling and optimization of processes for the production of coke and other petroleum products.

Keywords: delayed coking unit, petroleum coke, model system, fuzzy model, hybrid model, expert knowledge.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz