

УДК 665.63; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-2.13>

<https://orcid.org/0000-0002-8795-9622>

<https://orcid.org/0000-0003-2496-785X>

<https://orcid.org/0009-0001-0509-7572>

<https://orcid.org/0000-0002-8779-9614>

<https://orcid.org/0009-0002-7251-7570>

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАССООБМЕНА В КОЛОННЕ РАЗДЕЛЕНИЯ РАФИНАТА



**Д.М. ДИЯНОВ<sup>1</sup>**,  
магистр,  
[diaz.diyanov@kmgpetrochem.kz](mailto:diaz.diyanov@kmgpetrochem.kz)



**Д.М. АМАНГЕЛЬДИЕВ<sup>1</sup>**,  
магистр технических наук,  
[d.amangeldiyev@kmgpetrochem.kz](mailto:d.amangeldiyev@kmgpetrochem.kz)



**Р.М. ИСКАКОВ<sup>2</sup>**,  
доктор химических наук,  
профессор,  
[r.iskakov@aogu.edu.kz](mailto:r.iskakov@aogu.edu.kz)



**Д.К. КУДАСОВА<sup>3</sup>**,  
кандидат технических наук,  
[Danak2004@mail.ru](mailto:Danak2004@mail.ru)

**Г.Т. ШАКУЛИКОВА<sup>2</sup>**, доктор экономических наук, профессор, [rector@aogu.edu.kz](mailto:rector@aogu.edu.kz)

<sup>1</sup>ТОО «KMG PETROCHEM»

Республика Казахстан, 060000, г. Атырау, Смагулова, 1

<sup>2</sup>АТЫРАУСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НЕФТИ И ГАЗА ИМ. С. УТЕБАЕВА

Республика Казахстан, 060027, г. Атырау, ул. М.Баймуханова, 45а

<sup>3</sup>АО «АКАДЕМИЯ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

Республика Казахстан, 050039, г. Алматы, ул. Закарпатская, 44

*В работе рассмотрена промышленная ректификационная колонна рафината, эксплуатируемая в составе установки выделения ароматических углеводородов, для которой в процессе эксплуатации зафиксировано устойчивое снижение чёткости разделения между десорбентом и ароматическими компонентами C8.*

*На основе анализа промышленных данных и стационарного процессного моделирования с использованием уравнения состояния Пенга–Робинсона выполнено сопоставление проектных и фактических режимов работы. Установлено, что наблюдаемый унос пара-диэтилбензола в боковой отбор и загрязнение кубового продукта не могут быть объяснены исключительно режимными факторами. Для воспроизведения реального температурного профиля колонны в модели потребовалось снижение интегральной эффективности тарелок верхней секции колонны до 17 % по Мерффри, что указывает на наличие гидродинамических нарушений и снижение фактической массообменной эффективности контактных устройств. Показана высокая чувствительность качества продуктов к совокупному изменению давления и температуры орошения, особенно в условиях ограниченных возможностей теплоотвода в летний период эксплуатации.*

*Полученные результаты свидетельствуют о необходимости пересмотра состояния контактных устройств и обосновывают целесообразность аппаратной модернизации колонны как направления повышения устойчивости и эффективности процесса.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ректификация ароматических углеводородов, колонна рафината, эффективность тарелок, процессное моделирование, параксилон, парадизтилбензол, DWS.

## РАФИНАТТЫ БӨЛУ КОЛОННАСЫНДАҒЫ МАССОАЛМАСУ ТИІМДІЛІГІН ТАЛДАУ

Д.М. ДИЯНОВ<sup>1</sup>, магистр, [diaz.diyanov@kmgpetrochem.kz](mailto:diaz.diyanov@kmgpetrochem.kz)

Д.М. АМАНГЕЛДИЕВ<sup>1</sup>, магистр, [d.amangeldiyev@kmgpetrochem.kz](mailto:d.amangeldiyev@kmgpetrochem.kz)

Р.М. ИСКАКОВ<sup>2</sup>, химия ғылымдарының докторы, профессор, [r.iskakov@aogu.edu.kz](mailto:r.iskakov@aogu.edu.kz)

Д.К. КУДАСОВА<sup>3</sup>, техника ғылымдарының докторы, [danak2004@mail.ru](mailto:danak2004@mail.ru)

Г.Т. ШАКУЛИКОВА<sup>2</sup>, экономика ғылымдарының докторы, профессор, [rector@aogu.edu.kz](mailto:rector@aogu.edu.kz)

<sup>1</sup>«KMG PETROCHEM» ЖШС

Қазақстан Республикасы, 060000, Атырау қ., Смагулова, 1.

<sup>2</sup>САФИ ӨТЕБАЕВ АТЫНДАҒЫ АТЫРАУ МҰНАЙ ЖӘНЕ ГАЗ УНИВЕРСИТЕТІ

Қазақстан Республикасы, 060027, Атырау қ., М. Баймуханов көшесі, 45а.

<sup>3</sup>«АЗАМАТТЫҚ АВИАЦИЯ АКАДЕМИЯСЫ» АҚ

Қазақстан Республикасы, 050039, Алматы қ., Закарпатская көшесі, 44

*Зерттеуде ароматты көмірсутектерді бөліп алу қондырғысының құрамында пайдаланылатын өнеркәсіптік рафинат ректификациялық колоннасы қарастырылған, оның жұмыс барысында десорбент пен C8 ароматты компоненттері арасындағы бөліну айқындығының тұрақты түрде төмендеуі байқалған.*

Өндірістік деректерді талдау және Пенг–Робинсон күй теңдеуін қолдана отырып стационарлық процестік модельдеу негізінде жобалық және нақты жұмыс режимдерінің салыстырмалы талдауы жүргізілді. Пара-диэтилбензолдың бүйірлік іріктемеге уносы және кубтық өнімнің ластануы тек қана режимдік факторлармен түсіндірілмейтіні анықталды. Модельде колоннаның температуралық нақты профилі қайта жаңғырту үшін колоннаның жоғарғы секциясындағы табақшалардың интегралдық тиімділігін Мерффри бойынша 17 %-ға дейін төмендету қажет болды, бұл гидродинамикалық бұзылыстардың бар екендігін және жанасу құрылғыларының нақты массоалмасу тиімділігінің төмендегенін көрсетеді. Өнім сапасының колонна қысымы мен флегма температурасының бірлескен өзгерістеріне, әсіресе жазғы пайдалану кезеңінде жылу әкету мүмкіндіктері шектеулі жағдайларда, жоғары сезімтал екендігі көрсетілді.

Алынған нәтижелер жанасу құрылғыларының техникалық күйін қайта қарау қажеттігін және процестің тұрақтылығы мен тиімділігін арттыру мақсатында колоннаны аппараттық жаңғыртудың орындылығын ғылыми тұрғыдан негіздейді.

**ТҮЙІН СӨЗДЕР:** хош иісті айдау, рафинат бағаны, науа тиімділігі, процесті модельдеу, параксиллол, парадиетилбензол, DWC.

## DIAGNOSIS OF MASS-TRANSFER EFFICIENCY DETERIORATION IN AN INDUSTRIAL RAFFINATE DISTILLATION COLUMN

D.M. DIYANOV<sup>1</sup>, master, [diaz.diyanov@kmgpetrochem.kz](mailto:diaz.diyanov@kmgpetrochem.kz)

D.M. AMANGELDIYEV<sup>1</sup>, master, [d.amangeldiyev@kmgpetrochem.kz](mailto:d.amangeldiyev@kmgpetrochem.kz)

R.M. ISKAKOV<sup>2</sup>, doctor of chemical sciences, professor, [r.iskakov@aogu.edu.kz](mailto:r.iskakov@aogu.edu.kz)

D.K. KUDASSOVA<sup>3</sup>, PhD in technical sciences, [danak2004@mail.ru](mailto:danak2004@mail.ru)

G.T. SHAKULIKOVA<sup>2</sup>, doctor of economics, professor, [rector@aogu.edu.kz](mailto:rector@aogu.edu.kz)

<sup>1</sup>KMG PETROCHEM LLP

Republic of Kazakhstan, 060000 Atyrau, st. Smagulova, 1.

<sup>2</sup>SAFI UTEBAYEV ATYRAU UNIVERSITY OF OIL AND GAS

Republic of Kazakhstan, 060027, Atyrau, st. M. Baymukhanova, 45a.

<sup>3</sup>CIVIL AVIATION ACADEMY JSC

Republic of Kazakhstan, 050039 Almaty, st. Zakarpatskaya, 44.

*The study examines an industrial raffinate distillation column operating as part of an aromatic hydrocarbons recovery unit, for which a persistent deterioration in the sharpness of separation between the desorbent and C8 aromatic components has been observed during operation.*

*Based on the analysis of plant data and steady-state process simulation using the Peng–Robinson equation of state, a comparison between the design and actual operating conditions was performed. It was established that the observed carryover of para-diethylbenzene into the side draw and the contamination of the bottoms product cannot be explained solely by operating parameters. To reproduce the actual temperature profile of the column in the model, it was necessary to reduce the overall tray efficiency in the upper section of the column to 17% (Murphree efficiency), indicating the presence of hydrodynamic disturbances and a decrease in the effective mass-transfer performance of the contacting devices. The product quality was shown to be highly sensitive to the combined variation of column pressure and reflux temperature, particularly under conditions of limited heat removal capacity during summer operation.*

*The results demonstrate the need to reassess the condition of the internal contacting devices and substantiate the feasibility of hardware modernization of the column as a means of improving process stability and efficiency.*

**KEYWORDS:** aromatics distillation, raffinate column, tray efficiency, process simulation, paraxylene, paradiethylbenzene, DWC.

**В**ведение. Процесс каталитического риформинга нефти направлен на получение ароматических соединений, в частности бензол-толуол-ксилольной фракции. Наиболее ценный компонент фракции — параксилол [1], поэтому исследования оптимизации процессов его получения имеют важное значение. В последнее время исследования различных авторов сосредоточены на нескольких ключевых направлениях: разработке и совершенствовании технологий, а также подборе эффективных каталитических систем для процессов изомеризации ксилолов и трансалкилирования толуола и ароматических углеводородов C<sub>9</sub>; изучении адсорбционных систем и предложении способов селективного извлечения параксилора в движущемся слое; математическом моделировании процессов; оптимизации расхода энергоресурсов и других подходах, направленных на повышение эффективности производства параксилора [2-6].

Ректификационные колонны экстрактивной ректификации широко применяются в процессах разделения ароматических углеводородов и характеризуются высокой чувствительностью эффективности разделения к реальным условиям массообмена между паровой и жидкой фазами. В подобных системах достижение заданной чёткости разделения определяется не только проектными предпосылками, но и совокупным влиянием режимных, гидродинамических и конструктивных факторов, что в условиях промышленной эксплуатации может приводить к расхождению между расчётными и фактическими показателями работы.

В промышленной практике разделения ароматических углеводородов снижение эффективности контактных устройств может быть связано с гидродинамическими ограничениями, включая провал жидкости, унос пены и локальные перегрузки по пару, что приводит к ухудшению чёткости разделения даже при работе вблизи проектных режимов [8, 13].

Это подтверждается и опытом эксплуатации промышленных ректификационных колонн, что в ряде случаев требуемое качество продуктов не достигается даже при работе оборудования вблизи проектных режимных параметров [7]. Подобные отклонения, как правило, носят устойчивый характер и не могут быть однозначно объяснены отдельными возмущениями сырья или нарушениями управления, что обуславливает необходимость комплексного анализа с привлечением эксплуатационных данных и расчётных методов.

В качестве альтернативного варианта модернизации, помимо прямой замены контактных устройств, в мировой практике рассматривается внедрение колонн с перегородкой (DWC), которые доказали свою эффективность при разделении смесей ксилолов [9]. Однако, учитывая ограничения существующего корпуса колонны, наиболее капиталоеффективным решением на данном этапе является оптимизация контактных устройств без изменения конструктива корпуса, что подтверждается подходами, описанными в [10].

Актуальность повышения эффективности процессов выделения ароматики обусловлена стратегическими планами развития нефтегазохимической отрасли Республики Казахстан. Параксилол является ключевым сырьем для синтеза терефталевой кислоты (ТФК), необходимой для производства полиэтилентерефталата (ПЭТФ). В настоящее время компанией KMG Petrochem реализуется крупномасштабный про-

ект по строительству комплекса по производству ТФК и ПЭТФ мощностью до 735 тыс. тонн в год. Обеспечение стабильного выпуска параксилола требуемой чистоты (не менее 99.7%) является критическим условием для создания национальной цепочки добавленной стоимости «нефть – ароматика – ПЭТФ» и импортозамещения полимерной продукции.

В настоящей работе рассмотрена промышленная ректификационная колонна, эксплуатируемая в составе установки выделения ароматических углеводородов, для которой в процессе эксплуатации наблюдается устойчивое снижение чёткости разделения между высококипящим десорбентом и ароматическими углеводородами С8. Основное внимание уделено анализу эксплуатационных проявлений данной проблемы, оценке ограниченности режимной оптимизации и интерпретации наблюдаемого поведения колонны с использованием процессного моделирования, являющимся одним из основных и фундаментальных инструментов для анализа и управления технологическими процессами [11].

Целью работы является выявление возможных причин низкой эффективности разделения и обоснование направлений её повышения на основе сопоставления эксплуатационных данных, проектных предпосылок и результатов расчётного анализа. Процессное моделирование в рамках данной работы используется как инструмент интерпретации и согласования проектных и фактических характеристик работы колонны.

Научная новизна работы состоит в количественной диагностике деградации массообменной эффективности промышленной ректификационной колонны рафината методом согласования эксплуатационных данных и стационарного процессного моделирования. Установлено, что фактическое поведение колонны может быть воспроизведено только при снижении интегральной эффективности тарелок верхней секции до ~17 % по Мерффри, что указывает на системное гидродинамическое ограничение разделения. Выявлена сильная чувствительность качества продуктов к совместному изменению давления и температуры орошения при сезонных ограничениях теплоотвода, что позволяет обосновать направления аппаратной модернизации колонны.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования является промышленная колонна разделения рафината установки производства параксилола Parax X Атырауского НПЗ.

Предметом исследования является снижение фактической эффективности ректификационного разделения и расхождение эксплуатационных характеристик колонны с проектными показателями.

Колонна предназначена для разделения рафинатного потока с выделением ароматических углеводородов С7–С8 и регенерацией десорбента. На вход колонны подаются основной поток из смесительной ёмкости рафината D-607 и дополнительный поток из колонны рецикла ПДЭБ. Обобщённые расходы и составы сырьевых потоков приведены в *таблице 1*. В колонне формируются боковой отбор ароматической фракции, кубовый продукт десорбента, а также верхние газовая и водная фазы.

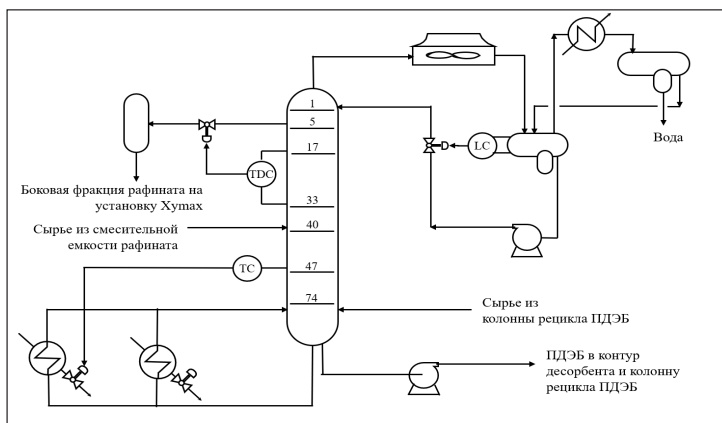


Рисунок 1 — Принципиальная схема колонны

Таблица 1 — Обобщённый состав и расходы сырьевых потоков колонны

Показатель	Сырьё из смешительной ёмкости рафината D-607	Сырьё из колонны рецикла ПДЭБ
Расход, т/ч	502.6	14.5
Толуол, масс.%	0.10	—
Этилбензол, масс.%	1.89	—
п-Ксилол, масс.%	0.38	—
м-Ксилол, масс.%	29.05	—
о-Ксилол, масс.%	13.30	—
Ароматика C9+, масс.%	0.12	0.18
ПДЭБ, масс.%	54.88	99.71

Ключевыми критериями качества продуктов являются содержание ароматических углеводородов C7–C8 в кубовом продукте не более 50 масс. ppm и содержание десорбента в боковой фракции не более 20 масс. ppm.

Проектный режим работы колонны включает циркуляционное орошение, теплоподвод через кипятильники и конденсацию верхнего продукта в системе воздушных и поверхностных теплообменников. Основные проектные параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Проектные режимные параметры колонны

Параметр / точка колонны	Проектное значение
Давление в верхней части колонны	1.0 кг/см <sup>2</sup> (изб.)
Температура верха колонны	168 °C
Отношение орошения к питанию	R/F = 1.0
Температура в узле конденсации перед сепаратором	167 °C
Давление после промежуточного охлаждения	0.7 кг/см <sup>2</sup> (изб.)
Температура после промежуточного охлаждения	130 °C
Давление в сепараторе верха колонны	0.5 кг/см <sup>2</sup> (изб.)
Температура в сепараторе верха колонны	40 °C
Давление в нижней части колонны	1.6 кг/см <sup>2</sup> (изб.)
Температура в нижней части колонны	226 °C

Колонна оснащена четырёхпоточными тарельчатыми контактными устройствами. Ввод питания осуществляется на тарелку №40, боковой отбор — в кармане тарелки №5, дополнительный ввод/сброс — на тарелке №54. Эти особенности учтены при построении расчётной модели.

Для расчёта фазового равновесия в системе «ароматические углеводороды С8 — пара-диэтилбензол» использовано уравнение состояния Пенга–Робинсона. Выбор модели обусловлен её применимостью к углеводородным смесям при повышенных давлениях и температурах и подтверждён литературными данными для близких систем [12].

Для учёта отклонения реальных ступеней от идеальных использовали эффективность по Мерффи:

$$EMV = (y_n - y_{n-1}) / (y^*_n - y_{n-1})$$

где  $y_n$  — фактический состав пара,  $y^*_n$  — равновесный состав.

В расчётах эффективность контактных устройств рассматривалась как варьируемый параметр при согласовании модели с эксплуатационными данными.

### Результаты и обсуждение

Анализ эксплуатационных данных показал, что ухудшение чёткости разделения проявляется прежде всего превышением спецификации по уносу десорбента в боковой отбор и одновременным увеличением содержания ароматических компонентов фракции С8 в кубовом продукте. Наиболее выражено эти отклонения наблюдаются при повышении давления в колонне и росте температуры орошения, возникающих при ограниченной эффективности конденсации в тёплый период эксплуатации.

В ряде устойчивых режимов ухудшение качества бокового и кубового продуктов происходило синхронно, что указывает на снижение общей эффективности разделения по высоте аппарата, а не на локальную проблему отдельного узла. Дополнительным признаком нестабильности являлись колебания состава и расхода бокового отбора при неизменных уставках регулирования, что свидетельствует о повышенной чувствительности колонны к незначительным изменениям паро-жидкостных нагрузок.

При снижении давления и одновременном увеличении расхода орошения с понижением его температуры наблюдалось улучшение показателей качества и повышение стабильности бокового отбора. Однако достижение подобных сочетаний параметров ограничено возможностями теплоотвода в системе конденсации, поэтому режимная оптимизация обеспечивает устойчивый эффект преимущественно в холодный и межсезонный периоды. Согласованное влияние давления, расхода и температуры орошения на показатели качества иллюстрируется экспериментальными точками на *рисунке 2*, каждая из которых соответствует стабилизированному эксплуатационному режиму.

На первом этапе расчёты выполнены при проектных режимных параметрах и условии теоретической эффективности тарелок 100 %. В этих предпосылках модель обеспечивала достижение требуемой чёткости разделения: содержание десорбента в боковом отборе и ароматических компонентов в кубовом продукте соответствовало регламентным требованиям. Расчётные показатели качества приведены в *таблице 3*. Таким образом, при проектных допущениях расчётная схема колонны является достаточной для обеспечения заданных спецификаций.

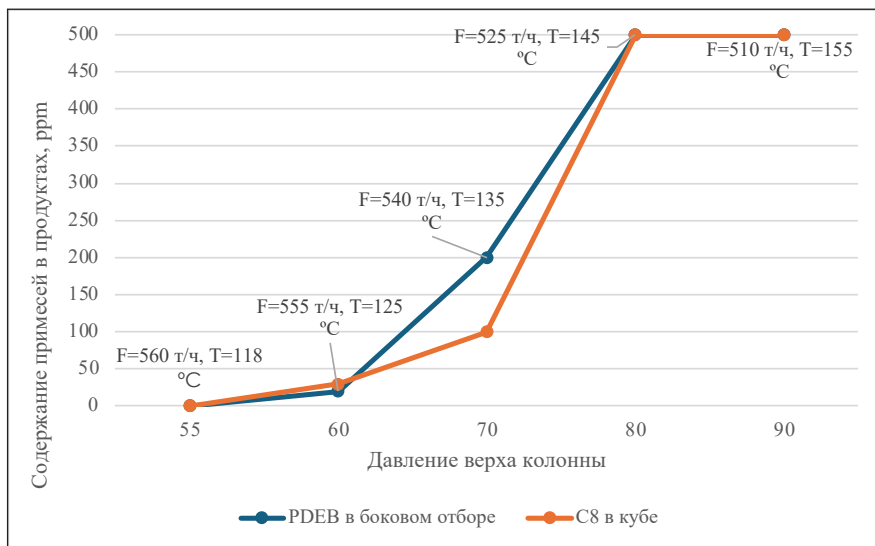


Рисунок 2 — Влияние совокупных режимных параметров (давление, расход и температура орошения) на показатели качества продуктов

Таблица 3 — Расчётные показатели качества продуктов при проектном режиме

Параметр	Расход бокового погона, кг/ч	Темп-ра на 18й тарелке, °C	Темп-ра на 34й тарелке, °C	Темп-ра на 42й тарелке, °C	Темп-ра на 48й тарелке, °C	ПДЭБ в боковом погоне, % масс.	ПДЭБ в кубе, % масс.	Ортоксилол кубе, % масс.
Фактические данные	170000	165,25	173,23	183,43	184,22	несколько случаев превышения	96,91	
Регламентные параметры	227000	162–166	166–170		206–210	Не более 0,0020		Не более 0,0050
Case 1	169100	162,0	167,4	183,7	200,0	0,0002	97,4	0,0000
Case 2	169200	162,3	168,2	185,4	200,9	0,0003	97,5	0,0000
Case 3	169300	162,7	168,9	186,6	201,5	0,0003	97,6	0,0000
Case 4	169400	163,1	169,7	187,8	202,2	0,0004	97,6	0,0000
Case 5	169500	163,5	170,4	188,9	202,8	0,0005	97,7	0,0000
Case 6	169600	163,8	171,1	189,8	203,4	0,0005	97,8	0,0000
Case 7	169700	164,2	171,8	190,7	204,0	0,0006	97,8	0,0000
Case 8	169800	164,6	172,5	191,7	204,7	0,0007	97,9	0,0000
Case 9	169900	165,0	173,3	192,6	205,3	0,0009	97,9	0,0000
Case 10	170000	165,4	174,2	193,7	206,0	0,0011	98,0	0,0000
Case 11	170100	166,0	175,2	194,8	206,8	0,0013	98,1	0,0000

Далее была выполнена попытка воспроизведения фактических режимов эксплуатации, характеризующихся пониженным давлением, сниженной температурой орошения и его увеличенным расходом. Для воспроизведения фактического температурного профиля по высоте колонны была выполнена зональная корректировка эффективности контактных устройств. С 1-й по 47-ю тарелку (верхняя секция колонны) интегральная эффективность по Мерффри была снижена до 17 %, тогда как для нижней части колонны эффективность сохранена на уровне 100 %. Только при таком распределении эффективности расчёт позволил воспроизвести фактический температурный профиль по высоте колонны. Соответствующие расчётные данные приведены в таблице 4.

Таблица 4 — Расчётные показатели качества продуктов при фактическом режиме

Параметр	Расход бокового погона, кг/ч	Темп-ра на 18й тарелке, °С	Темп-ра на 34й тарелке, °С	Темп-ра на 42й тарелке, °С	Темп-ра на 48й тарелке, °С	ПДЭБ в боковом погоне, %масс.	ПДЭБ в кубе, % масс.	Ортоксилол в кубе, % масс.
Фактические данные	170000	165,2	173,2	183,4	184,2	несколько случаев превышения	96,9	
Регламентные параметры	227000	162–166	166–170		206–210	Не более 0,0020		Не более 0,0050
Case 1.1	169100	162,7	168,8	179,0	177,4	0,0245	97,4	0,0003
Case 2.1	169200	162,9	169,2	179,3	178,0	0,0264	97,5	0,0001
Case 3.1	169300	163,1	169,7	179,6	178,5	0,0285	97,6	0,0001
Case 4.1	169400	163,4	170,1	179,9	179,2	0,0308	97,6	0,0001
Case 5.1	169500	163,6	170,6	180,3	179,8	0,0334	97,7	0,0001
Case 6.1	169600	163,9	171,1	180,6	180,5	0,0366	97,7	0,0000
Case 7.1	169700	164,2	171,7	181,0	181,2	0,0402	97,8	0,0000
Case 8.1	169800	164,5	172,3	181,4	182,0	0,0447	97,8	0,0000
Case 9.1	169900	164,9	173,0	181,9	182,9	0,0501	97,9	0,0000
Case 10.1	170000	165,3	173,8	182,5	183,8	0,0568	97,9	0,0000
Case 11.1	170100	165,8	174,7	183,0	184,9	0,0650	98,0	0,0000

Таким образом, необходимость снижения эффективности верхней секции колонны для воспроизведения фактического температурного профиля указывает на существенное отличие реальной массообменной эффективности контактных устройств от проектных предпосылок. При этом в расчётной модели не выявлены признаки классических гидравлических ограничений, таких как захлёбывание или предельная пропускная способность аппарата, что позволяет рассматривать снижение эффективности как интегральный показатель совокупных гидродинамических и эксплуатационных факторов. Результаты моделирования показали, что для воспроизведения фактического температурного профиля по высоте колонны требуется введение корректирующего коэффициента эффективности Мерффри ( $EMV \approx 17\%$ ) для верхней секции колонны (тарелки 1–47). При использовании проектных значений эффективности расчётная модель не обеспечивала удовлетворительного совпадения с фактическим температурным профилем колонны, хотя формально предсказывала достижение регламентных показателей качества; в то же время промышленная эксплуатация демонстрирует систематическое ухудшение качества продуктов. Следовательно, снижение эффективности является необходимым условием согласования расчёта с реальным поведением аппарата и отражает фактическое состояние массообмена в верхней зоне колонны.

Столь значительное отклонение от проектного диапазона указывает на выраженную деградацию массообменной эффективности. Вероятные причины носят гидродинамический и эксплуатационный характер. Во-первых, при повышении давления и температуры рабочая точка тарелок может смещаться в область неблагоприятных режимов — к границе струйного захлёбывания (jet flooding) либо в зону провала жидкости (weering) при недостаточной нагрузке по пару. В обоих случаях нарушается устойчивость барботажа, часть фаз проходит через тарелку без полноценного контакта, что математически проявляется снижением  $EMV$ . Во-вторых, при длительной эксплуатации возможно ухудшение состояния клапанных элементов — частичное заклинивание, износ, коррозионное изменение геометрии, что ведёт к

неравномерному распределению пара и жидкости по сечению аппарата. В-третьих, при высоких жидкостных нагрузках усиливается межтарельчатое перемешивание (обратное перемешивание), сопровождающееся уносом пены и снижением локальной движущей силы массообмена.

Таким образом, значение 17 % следует рассматривать как интегральный показатель совокупного влияния гидродинамических и конструктивных факторов. Отсутствие в расчётах признаков предельной пропускной способности подтверждает системный характер ограничения разделения. В мировой практике повышения эффективности разделения ароматических углеводородов рассматриваются как модернизация контактных устройств действующих колонн, так и внедрение термически интегрированных схем, включая колонны с внутренней перегородкой (DWC) [9, 14].

В краткосрочной перспективе целесообразна ревизия и модернизация контактных устройств верхней секции. В стратегическом плане при реконструкции установки может быть рассмотрено применение колонны с внутренней перегородкой (Dividing Wall Column, DWC). Концепция DWC позволяет реализовать эквивалент трёхсекционного разделения в одном корпусе за счёт пространственного разделения потоков пара и жидкости перегородкой, что снижает термодинамическую необратимость смещения и повышает энергетическую эффективность [15-17]. Для системы «рафинат — ароматическая фракция — десорбент» это потенциально позволяет уменьшить тепловую нагрузку на ребойлер, повысить чистоту бокового отбора и снизить чувствительность процесса к сезонным ограничениям теплоотвода [18]. Однако внедрение DWC требует детального гидравлического расчёта распределения фаз и отдельного технико-экономического обоснования применительно к рассматриваемой установке.

Экономическая оценка выполнена на основе фактических производственных данных установки за последние периоды эксплуатации, включая режимы работы, объёмы выпуска параксилола и показатели качества продукции в летний период. В большинстве отчётных периодов установка эксплуатируется на уровне порядка 75 % от проектной мощности, что соответствует средней производительности по параксилолу около 47 т/ч.

Анализ данных за летние месяцы (июнь–август) при средней дневной температуре окружающей среды выше 30 °С показывает устойчивое увеличение доли продукции, не соответствующей спецификации по содержанию десорбента. Средняя доля такого продукта в указанный период достигает около 20 % от объёма выпуска.

Объём продукции, требующей дополнительной переработки либо реализации по пониженной цене, за летний период продолжительностью 92 суток определён по выражению:

$$M=47\text{т/ч}\times 24\text{ч/сут}\times 92\text{сут}\times 0,20=20755\text{т}.$$

Полученное значение соответствует значительному объёму товарных потерь за сезон эксплуатации.

При средневзвешенной контрактной цене параксилола порядка 500 USD/т прямые финансовые потери за летний период оцениваются на уровне около 10,4 млн USD, что эквивалентно приблизительно 5,2 млрд тенге. В расчёт включены только потери от отклонения по качеству; дополнительные косвенные затраты (перерасход

энергоресурсов, усложнение технологической схемы, увеличение циркуляционных потоков) в данной оценке не учитывались.

Согласно данным материального баланса, в летний период фиксируется также увеличение расхода подпиточного десорбента (ПДЭБ), связанное с его повышенным уносом в боковой отбор. Дополнительный расход составляет порядка 20 т в год при удельной стоимости около 3,5 млн тенге за тонну, что формирует дополнительные затраты порядка 70 млн тенге ежегодно.

Оценочная стоимость замены контактных устройств верхней секции колонны составляет около 1,75 млрд тенге. Сопоставление капитальных затрат с величиной сезонных потерь показывает, что даже частичное устранение выявленных отклонений обеспечивает срок окупаемости менее одного года, что подтверждает экономическую обоснованность аппаратных мероприятий.

### **Заключение и выводы**

В работе проведён анализ эффективности промышленной колонны разделения рафината с использованием эксплуатационных данных и стационарного моделирования. Результаты позволили выявить причины снижения эффективности и определить направления её повышения. На основании этого сформулированы следующие выводы:

1. Впервые для промышленной колонны разделения рафината установки производства параксилола выполнена количественная диагностика снижения фактической эффективности ректификационного разделения на основе согласования эксплуатационных данных и стационарного процессного моделирования.


2. Установлено, что воспроизведение реального температурного профиля колонны возможно только при снижении интегральной эффективности контактных устройств верхней секции до  $EMV \approx 17\%$ , что свидетельствует о существенной деградации массообмена и расхождении фактических характеристик работы колонны с проектными предпосылками.

3. Показано, что ухудшение разделения носит системный характер и не может быть объяснено исключительно режимными факторами, а связано с интегральным влиянием гидродинамических и эксплуатационных ограничений.

4. Выявлена высокая чувствительность эффективности разделения к совместному изменению давления колонны и температуры орошения в условиях сезонных ограничений теплоотвода, что ограничивает потенциал режимной оптимизации.

5. На основе анализа производственных данных количественно оценены потери от выпуска некондиционной продукции, достигающие порядка 20 755 т за летний период, что соответствует прямым финансовым потерям около 10,4 млн USD.

6. Обоснована техническая и экономическая целесообразность модернизации контактных устройств как эффективного направления повышения устойчивости процесса и качества продукции.

7. Полученные результаты могут быть использованы при диагностике ограничений массообмена в аналогичных колоннах разделения ароматических углеводородов, а также при разработке мероприятий по повышению эффективности действующих установок. 

## ЛИТЕРАТУРА

1. Цаплин Д. Е., Остроумова В. А., Горбунов Д. Н., Куликов Л. А., Наранов Е. Р., Егазьянц С. В. Диспропорционирование толуола на цеолитах ZSM-12 // Журнал прикладной химии. – 2022. – Т. 95, вып. 11–12. – С. 1400–1409. [Tsaplin D. E., Ostroumova V. A., Gorbunov D. N., Kulikov L. A., Naranov E. R., Egazaryants S. V. Disproportsonirovanie toluola na tseolitakh ZSM-12 // Zhurnal prikladnoy khimii. – 2022. – T. 95, vyp. 11–12. – S. 1400–1409.]
2. Князева Е. Е., Коннов С. В., Тихонова А. А., Пономарева О. А., Иванова И. И. Диспропорционирование толуола на рекристаллизованных цеолитах MFI // Нефтехимия. – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 500–505. [Knyazeva E. E., Konnov S. V., Tikhonova A. A., Ponomareva O. A., Ivanova I. I. Disproportsonirovanie toluola na rekristallizovannykh tseolitakh MFI // Neftekhimiya. – 2015. – T. 55, No. 6. – S. 500–505.]
3. Керимли Ф. Ш., Магеррамов А. М., Мамедов С. Э., Азмамедова Х. М. Изомеризация смеси ксилолов и этилбензола на полиметаллическом катализаторе // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2017. – № 9. – С. 21–22. [Kerimli F. Sh., Magerramov A. M., Mamedov S. E., Azmamedova Kh. M. Izomerizatsiya smesi ksilolov i etilbenzola na polimetallicheskom katalizatore // Neftepererabotka i neftekhimiya. – 2017. – No. 9. – S. 21–22.]
4. Якубов Й. Ю. Адсорбция пара-ксилола в цеолите KZSM-5 // Fundamental and Applied Approaches to Solving Scientific Problems: материалы международной научно-практической конференции. – НИЦ «Вестник науки», 2020. – С. 13–18. [Yakubov Y. Yu. Adsorbtsiya para-ksilola v tseolite KZSM-5 // Fundamental and Applied Approaches to Solving Scientific Problems: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – NITs "Vestnik nauki", 2020. – S. 13–18.]
5. Yang M. L., Hu R., Long J., Lv Y. J., Ye Z. C., Li Z., Zhong W. M. Моделирование и оптимизация псевдодвижущегося слоя для очистки параксилола // Нефтехимия. – 2021. – Т. 61, № 2. – С. 245–251. [Yang M. L., Hu R., Long J., Lv Y. J., Ye Z. C., Li Z., Zhong W. M. Modelirovanie i optimizatsiya psevdodvizhushchegosya sloya dlya ochistki parakxilola // Neftekhimiya. – 2021. – T. 61, No. 2. – S. 245–251.]
6. Скрипник А. С., Дудник А. А., Хисамова М. Н. Применение ионных жидкостей в процессе изомеризации ксилолов с целью сокращения расхода топливно-энергетических ресурсов // Наука молодых – будущее России: материалы конференции МЛ-49, 10–11 декабря 2020 г. – 2020. – Т. 4. – С. 334–336. [Skripnik A. S., Dudnik A. A., Khisamova M. N. Primenenie ionnykh zhidkostey v protsesse izomerizatsii ksilolov s tsel'yu sokrashcheniya raskhoda toplivno-energeticheskikh resursov // Nauka molodykh – budushchee Rossii: materialy konferentsii ML-49, 10–11 dekabrya 2020 g. – 2020. – T. 4. – S. 334–336.]
7. Battyrbayeva A., et al. Analysis of the efficiency of separation equipment at Kazakhstan refineries. Journal of Oil & Gas, 2021, 3(123), 45–52.
8. Wang Y., et al. Hydraulic performance and mass transfer efficiency of valve trays in the p-xylene production process. Separation and Purification Technology, 2020, 251, 117369.
9. Slade B., Stober B., Stober K. Dividing wall column revamp optimises mixed xylenes production. Sulzer Chemtech Technical Review, 2006.
10. Chen J., et al. Revamping distillation systems for energy reduction in petrochemical industries: A review. Applied Thermal Engineering, 2023, 219, 119420.
11. Шапошников А. Д., Терентьева Н. А., Усманова Ю. Х. Моделирование процесса гидроочистки и гидродепарафинизации дизельной фракции в программном комплексе Aspen Hysys // Вестник технологического университета. – 2025. – Т. 28, № 10.

- С. 127–133. [Shaposhnikov A. D., Terent'eva N. A., Usmanova Yu. Kh. Modelirovanie protsessa gidroochistki i gidrodeparafinizatsii dizel'noy fraktsii v programmnom komplekse Aspen Hysys // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – 2025. – T. 28, No. 10. – S. 127–133.]
12. Li X., et al. Energy-efficient optimization of the aromatics separation process based on the simulated annealing algorithm. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 168, 334–34.
  13. Zhang L., Liu Q. Process simulation and bottleneck analysis of a heavy aromatics column in an industrial complex. *Petroleum Science and Technology*, 2022, 40(5), 567–580.
  14. Dejanović I., Matijašević L., Olujić Ž. An effective method for establishing the stage and reflux requirement of three-product dividing wall columns. *Chemical Engineering and Processing*, 2011, 50(5), 25–35.
  15. Amminudin K., Smith R. Design and Optimization of Fully Thermally Coupled Distillation Columns: Part 2: Application of Dividing Wall Columns in Retrofit. *Chemical Engineering Research and Design*, 2001, 79(7), 716–724.
  16. Bravo-Bravo C., et al. Extractive Dividing Wall Column: Design and Optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(7), 125–135.
  17. Long N. V. D., Lee M. Improved energy efficiency in debottlenecking using a fully thermally coupled distillation column. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2011, 6(5), 115–125.
  18. Sangal V., Kumar V. K., Mishra I. M. Optimization of structural and operational variables for the energy efficiency of a divided wall distillation column. *Computers and Chemical Engineering*, 2012, 34, 1–10.