

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,916
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,284

Журнал издается с 2003 г.
12 выпусков в год

Электронная версия журнала top-technologies.ru/ru
Правила для авторов: top-technologies.ru/ru/rules/index
Подписной индекс по электронному каталогу «Почта России» – ПА037

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Ледванов Михаил Юрьевич, д.м.н., профессор

Ответственный секретарь редакции

Бизенкова Мария Николаевна

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.т.н., профессор, Айдосов А. (Алматы); д.г.-м.н., профессор, Алексеев С.В. (Иркутск); д.х.н., профессор, Алов В.З. (Нальчик); д.т.н., доцент, Аршинский Л.В. (Иркутск); д.т.н., профессор, Ахтулов А.Л. (Омск); д.т.н., профессор, Баёв А.С. (Санкт-Петербург); д.т.н., профессор, Баубеков С.Д. (Тараз); д.т.н., профессор, Беззубцева М.М. (Санкт-Петербург); д.п.н., профессор, Безрукова Н.П. (Красноярск); д.т.н., доцент, Белозеров В.В. (Ростов-на-Дону); д.т.н., доцент, Бессонова Л.П. (Воронеж); д.п.н., доцент, Бобыкина И.А. (Челябинск); д.г.-м.н., профессор, Бондарев В.И. (Екатеринбург); д.п.н., профессор, Бутов А.Ю. (Москва); д.т.н., доцент, Быстров В.А. (Новокузнецк); д.г.-м.н., профессор, Гавришин А.И. (Новочеркасск); д.т.н., профессор, Герман-Галкин С.Г. (Щецин); д.т.н., профессор, Германов Г.Н. (Москва); д.т.н., профессор, Горбатюк С.М. (Москва); д.т.н., профессор, Гоц А.Н. (Владимир); д.п.н., профессор, Далингер В.А. (Омск); д.псх.н., профессор, Долгова В.И., (Челябинск); д.э.н., профессор, Долятовский В.А. (Ростов-на-Дону); д.х.н., профессор, Дресвянников А.Ф. (Казань); д.псх.н., профессор, Дубовицкая Т.Д. (Сочи); д.т.н., доцент, Дубровин А.С. (Воронеж); д.п.н., доцент, Евтушенко И.В. (Москва); д.п.н., профессор, Ефремова Н.Ф. (Ростов-на-Дону); д.п.н., профессор, Жеребило Т.В. (Грозный); д.т.н., профессор, Завражнов А.И. (Мичуринск); д.п.н., доцент, Загrevский О.И. (Томск); д.т.н., профессор, Ибраев И.К. (Караганда); д.т.н., профессор, Иванова Г.С. (Москва); д.х.н., профессор, Ивашевич А.Н. (Москва); д.ф.-м.н., профессор, Ижуткин В.С. (Москва); д.т.н., профессор, Калмыков И.А. (Ставрополь); д.п.н., профессор, Качалова Л.П. (Шадринск); д.псх.н., доцент, Кибальченко И.А. (Таганрог); д.п.н., профессор, Клемантович И.П. (Москва); д.п.н., профессор, Козлов О.А. (Москва); д.т.н., профессор, Козлов А.М. (Липецк); д.т.н., доцент, Козловский В.Н. (Самара); д.т.н., доцент, Красновский А.Н. (Москва); д.т.н., профессор, Крупенин В.Л. (Москва); д.т.н., профессор, Кузлякина В.В. (Владивосток); д.т.н., доцент, Кузяков О.Н. (Тюмень); д.т.н., профессор, Куликовская И.Э. (Ростов-на-Дону); д.т.н., профессор, Лавров Е.А. (Суми); д.т.н., доцент, Ландэ Д.В. (Киев); д.т.н., профессор, Леонтьев Л.Б. (Владивосток); д.ф.-м.н., доцент, Ломазов В.А. (Белгород); д.т.н., профессор, Ломакина Л.С. (Нижний Новгород); д.т.н., профессор, Лубенцов В.Ф. (Краснодар); д.т.н., профессор, Мадера А.Г. (Москва); д.т.н., профессор, Макаров В.Ф. (Пермь); д.п.н., профессор, Марков К.К. (Иркутск); д.п.н., профессор, Матис В.И. (Барнаул); д.г.-м.н., профессор, Мельников А.И. (Иркутск); д.п.н., профессор, Микерова Г.Ж. (Краснодар); д.п.н., профессор, Моисеева Л.В. (Екатеринбург); д.т.н., профессор, Мурашкина Т.И. (Пенза); д.т.н., профессор, Мусаев В.К. (Москва); д.т.н., профессор, Надеждин Е.Н. (Тула); д.ф.-м.н., профессор, Никонов Э.Г. (Дубна); д.т.н., профессор, Носенко В.А. (Волгоград); д.т.н., профессор, Осипов Г.С. (Южно-Сахалинск); д.т.н., профессор, Пен Р.З. (Красноярск); д.т.н., профессор, Петров М.Н. (Красноярск); д.т.н., профессор, Петрова И.Ю. (Астрахань); д.т.н., профессор, Пивень В.В. (Тюмень); д.э.н., профессор, Потышняк Е.Н. (Харьков); д.т.н., профессор, Пузряков А.Ф. (Москва); д.п.н., профессор, Рахимбаева И.Э. (Саратов); д.п.н., профессор, Резанович И.В. (Челябинск); д.т.н., профессор, Рогачев А.Ф. (Волгоград); д.т.н., профессор, Рогов В.А. (Москва); д.т.н., профессор, Санинский В.А. (Волжский); д.т.н., профессор, Сердобинцев Ю.П. (Волгоградский); д.э.н., профессор, Сихимбаев М.Р. (Караганда); д.т.н., профессор, Скрыпник О.Н. (Иркутск); д.п.н., профессор, Собянин Ф.И. (Белгород); д.т.н., профессор, Страбыкин Д.А. (Киров); д.т.н., профессор, Сугак Е.В. (Красноярск); д.ф.-м.н., профессор, Тактаров Н.Г. (Саранск); д.п.н., доцент, Тутолмин А.В. (Глазов); д.т.н., профессор, Умбетов У.У. (Кызылорда); д.м.н., профессор, Фесенко Ю.А. (Санкт-Петербург); д.п.н., профессор, Хола Л.Д. (Нерюнгри); д.т.н., профессор, Часовских В.П. (Екатеринбург); д.т.н., профессор, Ченцов С.В. (Красноярск); д.т.н., профессор, Червяков Н.И. (Ставрополь); д.т.н., профессор, Шалумов А.С. (Ковров); д.т.н., профессор, Шарафеев И.Щ. (Казань); д.т.н., профессор, Шишков В.А. (Самара); д.т.н., профессор, Щипицын А.Г. (Челябинск); д.т.н., профессор, Яблокова М.А. (Санкт-Петербург)

«СОВРЕМЕННЫЕ НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 63399.

Все публикации рецензируются. Доступ к электронной версии журнала бесплатный.

Двухлетний импакт-фактор РИНЦ = 0,916.

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ = 0,284.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.

Учредитель, издательство и редакция:
ООО ИД «Академия Естествознания»

Почтовый адрес: 105037, г. Москва, а/я 47

Адрес редакции: 440026, Пензенская область, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3

Ответственный секретарь редакции

Бизенкова Мария Николаевна

тел. +7 (499) 705-72-30

E-mail: edition@rae.ru

Подписано в печать – 27.05.2020

Дата выхода номера – 27.06.2020

Формат 60×90 1/8

Типография

ООО «Научно-издательский центр Академия Естествознания»

410035, Саратовская область, г. Саратов, ул. Мамонтовой, 5

Техническая редакция и верстка

Байгузова Л.М.

Корректор

Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.

Способ печати – оперативный

Распространение по свободной цене

Усл. печ. л. 30,38

Тираж 1000 экз. Заказ СНТ 2020/5

Подписной индекс ПА037

© ООО ИД «Академия Естествознания»

УДК 681.516.72

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЛОКОМ ЭКСТРАКТИВНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗОПРЕНА

^{1,2}Кривошеев В.П., ¹Филимонцев Е.А., ¹Ефимов И.М.

¹ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, e-mail: krivosheev.vp@dvfu.ru;

²ФГАОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»,
Владивосток, e-mail: vladimir.krivosheev@vvsu.ru

Выполнен структурный и параметрический синтез системы управления блоком экстрактивной ректификации четырёхколонной ректификационной установки, предназначенной для выделения изопрена. Основой для выполнения данной работы явились результаты статической оптимизации этой установки по поддержанию статических режимов колонн, обеспечивающих минимизацию энергетических затрат на разделение исходной смеси до получения целевого продукта (изопрена) требуемого качества. При синтезе системы управления многоколонной ректификационной установкой применено имитационное моделирование переходных процессов, варьируя настроечные параметры регуляторов в системах стабилизации, а также компенсаторов в комбинированных системах. Для определения передаточных функций компенсаторов в комбинированных системах использованы передаточные функции объектов по каналам возмущения и управления, найденные из переходных функций по этим каналам. Для определения переходных функций выполнено моделирование динамических режимов. В процессе моделирования динамических режимов данные для расчёта статических режимов ректификационных колонн дополнены информацией о конструктивных параметрах, формирующих инерционные свойства колонн. В данной работе были использованы результаты ранее выполненного параметрического синтеза первой и второй колонн рассматриваемой четырёхколонной ректификационной установки. При скачкообразном изменении расхода питания в головную колонну четырёхколонной ректификационной установки в режиме энергосбережения смоделирован устойчивый переходной процесс извлечения конечного продукта требуемого качества.

Ключевые слова: изопрен, ректификационная установка, оптимизация, моделирование статических и динамических режимов, синтез системы управления

SYNTHESIS OF AN EXTRACTIVE RECTIFICATION UNIT CONTROL SYSTEM IN THE PRODUCTION OF ISOPRENE

^{1,2}Krivosheev V.P., ¹Filimontsev E.A., ¹Efimov I.M.

¹Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: krivosheev.vp@dvfu.ru;

²Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, e-mail: vladimir.krivosheev@vvsu.ru

Structural and parametric synthesis of the control system of the extractive rectification unit of four columns of a rectification unit designed to isolate isoprene was performed. The basis for this work was the results of static optimization of this installation to maintain static column conditions, which minimize energy costs for the separation of the initial mixture to obtain the target product (isoprene) of the required quality. In the synthesis of the control system of a multi-column rectification unit, simulation of transient processes is applied, varying the tuning parameters of the regulators in stabilization systems, as well as compensators in combined systems. To determine the transfer functions of compensators in combined systems, we used the transfer functions of objects on the perturbation and control channels found from the transition functions on these channels. To determine the transition functions, dynamic modes are simulated. In the process of modeling dynamic modes, the data for calculating the static modes of distillation columns are supplemented with information about the design parameters that form the inertial properties of the columns. In this work we used the results of previously performed parametric synthesis of the first and second columns of the four columns of a distillation unit under consideration. With a jump-like change in the power consumption to the head column of the four columns of the distillation unit in the energy saving mode a stable transition process of extracting the final product of the required quality is simulated.

Keywords: isoprene, distillation unit, optimization, modeling of static and dynamic modes, control system synthesis

Процесс ректификации составляет большую долю в процессах химической технологии и в связи с его энергоёмкостью решение задачи энергосбережения привлекает многих исследователей как к оптимизации статических режимов, так и к синтезу систем автоматизации ректификационных колонн для их функционирования в производственных условиях. Этим обусловлен интерес к исследованию динамики процесса ректификации с целью энергосбережения [1, 2] и созданию систем управления этим процессом [3].

Изопрен является одним из важнейших продуктов нефтехимической промышленности. Он используется в качестве мономера для производства синтетического каучука [4]. Фракция C_5 пиролиза вызывает интерес как источник изопрена, так как выделение изопрена до требуемой чистоты из этой фракции экономически более выгодно по сравнению с производством изопрена методами химического синтеза [5].

Ранее был выполнен синтез схемы выделения изопрена и проведена статическая

оптимизации параметров работы колонн разделения [6]. Позднее [7] на основе результатов статической оптимизации синтезирована система управления начальными колоннами К-1 и К-2 четырёхколонной установки по выделению изопрена требуемого качества.

Целью исследования является структурный и параметрический синтез устойчивой системы управления колоннами К-3 и К-4 четырёхколонной ректификационной установки в режиме энергосбережения для получения конечного продукта с массовой долей изопрена не ниже 0,95 с учётом результатов синтеза системы управления начальными колоннами К-1 и К-2, опубликованных в работе [7].

Технологическая и функциональная схемы выделения изопрена

На рис. 1 показана схема четырёхколонной ректификационной установки выделения изопрена из углеводородов фракции C₅ пиролиза.

В данной схеме К-1, К-2, К-4 – колонны традиционной ректификации; а К-3 – колонна экстрактивной ректификации. Данная схема смоделирована в Unisim Design [8].

Во всех колоннах используется конденсатор с полным фазовым переходом при давлении 100 кПа. Колонна К-1 предназначена для отгона легколетучих компонентов фракции C₅, а в колонне К-2 из кубового продукта колонны К-1 отгоняется от труднолетучих компонентов смесь, содержащая изопрен. Назначение, параметры колонн К-1 и К-2 в базовом режиме, результаты их статической оптимизации и синтеза системы управления в режиме энергосбережения приведены в статье [7].

В дальнейшем подсистему, состоящую из колонн К-3 и К-4, будем называть блоком экстрактивной ректификации.

На рис. 2 представлен блок экстрактивной ректификации, выделенный из общей схемы четырёхколонной установки (рис. 1).

Дистиллят колонны К-2 в виде потока D2 смешивается в определённом соотношении с экстрагентом (ДМФА).

Полученная смесь поступает в качестве питания на 11-ю тарелку колонны экстрактивной ректификации К-3, содержащую 114 тарелок. Обедненная смесь углеводородов выводится из колонны дистиллятом D3, а поток, содержащий 6% изопрена и 95% ДМФА, отбирается в виде кубового продукта W3.

В колонне К-4, содержащей 10 тарелок, происходит процесс регенерации ДМФА и выделение целевого продукта (изопрена). Питание в колонну в виде потока W3 поступает на 9-ю тарелку. Конечный продукт отбирается сверху колонны в качестве дистиллята с массовой долей изопрена не ниже 0,995, а ДМФА отгоняется в виде кубового продукта.

В табл. 1 представлены основные технологические параметры статической модели блока экстрактивной ректификации.

Синтез системы управления блоком экстрактивной ректификации выполняется поэтапно в той же последовательности, что и для колонн К-1 и К-2 [7].

Определение контрольных тарелок

Контрольные тарелки в колоннах К-3 и К-4 определяются по методике, используемой при синтезе систем управления К-1 и К-2 [7]. В качестве контрольных тарелок были выбраны 74 и 10 тарелка для колонны К-3 и К-4 соответственно.

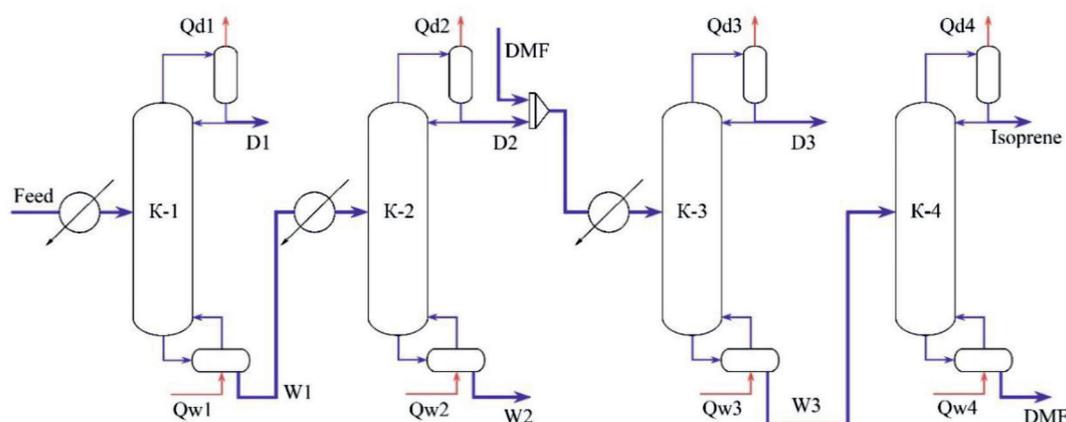


Рис. 1. Схема выделения изопрена из углеводородов фракции C₅ пиролиза

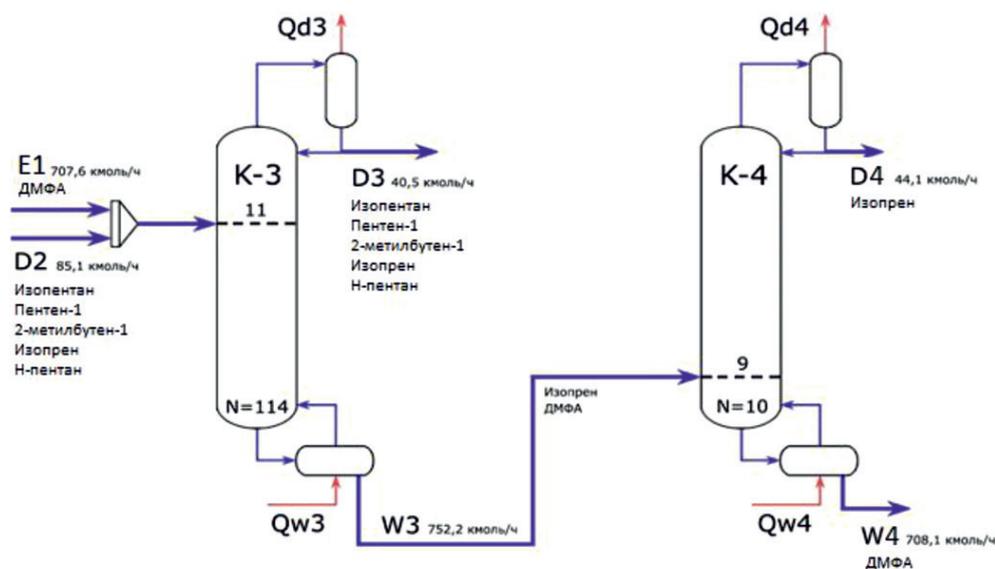


Рис. 2. Технологическая схема блока экстрактивной ректификации изопрена

Таблица 1
Технологические параметры статической модели блока экстрактивной ректификации

Параметр	Значение
Расход питания, D2 + E1 (кмоль/ч)	792,7
Содержание изопрена в потоке D2 (мол. дол.)	0,063
Расход дистиллята из колонны К-3, D3 (кмоль/ч)	40,5
Расход кубовой жидкости из колонны К-3, W3 (кмоль/ч)	752,2
Содержание изопрена в потоке W3 (мол. дол.)	0,06
Флегмовое число (К-3)	10,7
Расход дистиллята (К-4), D4 (кмоль/ч)	44,1
Содержание изопрена в продуктовом потоке D4 (мол. дол.)	0,997
Расход кубовой жидкости из колонны К-4, W4 (кмоль/ч)	708,1
Флегмовое число (К-4)	1,0

Статическая оптимизация колонн блока экстрактивной ректификации

При статической оптимизации четырёхколонной установки минимизируются энергетические затраты при получении изопрена требуемого качества. Результаты оптимизации, относящиеся к колоннам К-1 и К-2, опубликованы в работе [7].

В табл. 2 и 3 для оптимальных режимов показаны зависимости расхода основных потоков и температур на контрольных тарелках колонн блока экстрактивной ректификации от изменения расхода питания в колонну К-3.

Из результатов статической оптимизации следует, что температура на контрольных тарелках обеих колонн при изменении расхода питания в колонну К-3 изменяется

незначительно. Это позволяет стабилизацию качества продуктов, содержащих изопрен, обеспечить стабилизацией температуры на этих тарелках. Анализ зависимости потоков колонн К-3 и К-4 показывает, что расходы потоков этих колонн линейно зависят от расхода питания в колонну К-3. В связи с этим расходы потоков колонны К-4 зависят тоже линейно от расхода питания в колонну К-4, что подтверждается данными, приведёнными в табл. 2 и 3.

Предлагаемая схема системы управления

Схема системы управления блоком экстрактивной ректификации изопрена из фракции C_5 пиролиза представлена на рис. 3. Она реализует линейные зависимости расхода потоков в колонне от расхода питания в эту колонну.

Таблица 2

Результаты статической оптимизации колонны К-3

Расход пита- ния F, кг/ч	Расход дистил- лята D3, кг/ч	Расход кубо- вого продук- та W3, кг/ч	Тепловой поток конденсатора Qd3, кДж/ч	Тепловой по- ток ребойлера Qw3, кДж/ч	Расход флегмы L3, кг/ч	Температура на КТ, °С
51836,53	2583,79	49252,74	8339381	14686729	20339,20	61,16
54716,34	2729,13	51987,20	8783907	15485928	21414,89	61,16
57596,14	2873,07	54723,07	9243121	16298223	22533,04	61,15
60475,95	3018,42	57457,53	9687651	17097446	23608,73	61,13
63355,76	3163,77	60191,99	10132162	17896699	24684,37	61,10

Таблица 3

Результаты статической оптимизации колонны К-4

Расход пита- ния F, кг/ч	Расход дистил- лята D4, кг/ч	Расход кубо- вого продук- та W4, кг/ч	Тепловой поток конденсатора Qd4, кДж/ч	Тепловой поток ребойлера Qw4, кДж/ч	Расход флегмы L4, кг/ч	Температу- ра на КТ, °С
51836,53	2644,69	46608,05	1908825	8259594	2488,15	131,17
54716,34	2789,47	49197,73	2012366	8712542	2621,79	131,09
57596,14	2938,27	51784,81	2129317	9191123	2787,47	131,61
60475,95	3081,46	54376,07	2225018	9629511	2901,62	131,19
63355,76	3228,36	56963,62	2338997	10101384	3061,21	131,56

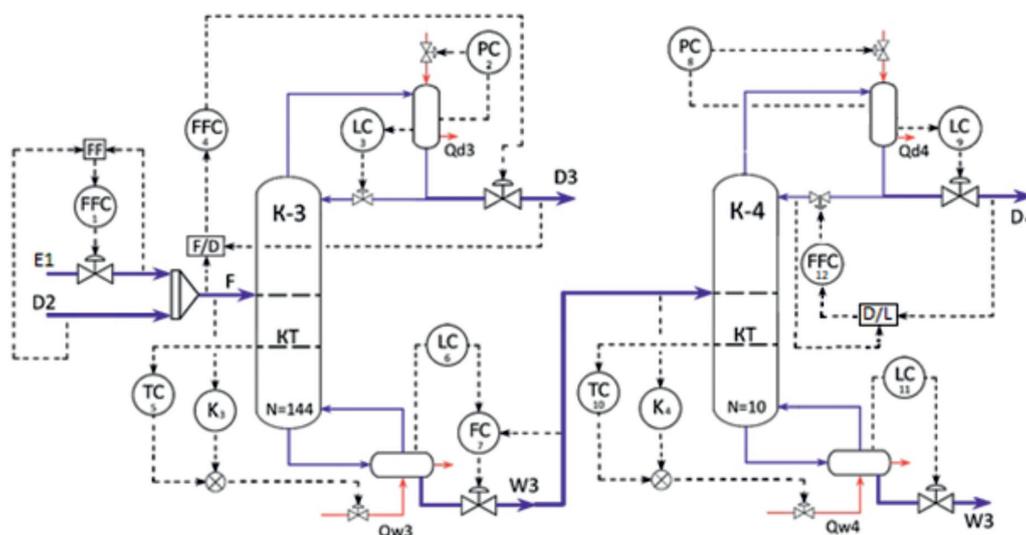


Рис. 3. Схема системы управления блоком экстрактивной ректификации

Формирование потока питания в колонну К-3 обеспечивает система регулирования соотношения расходов потока D_2 и экстрагента на значении 1:7,6. В обеих колоннах стабилизируется давление изменением расхода охлаждающего агента в конденсатор. В верхней части колонны К-3 регулируется соотношение расхода дистиллята и расхода питания в колонну, а уровень в конденсаторе регулируется расходом орошения в колонну. В нижней части колонны К-2 применена комбинированная система: регулирование расхода теплового агента в зависимости

от расхода питания в колонну с коррекцией по температуре на 74 тарелке. Для уменьшения возмущения в колонну К4 применена каскадная система регулирования расхода потока W_3 с коррекцией по уровню в колонне К-3.

В табл. 4 приведены настроечные параметры ПИ-регуляторов, используемых при регулировании колонн К-3 и К-4. Настроечные параметры регуляторов получены имитационным моделированием переходных процессов в системе управления четырёх-колонной установкой.

Выбор и настройка компенсаторов для К-3 и К-4

В результате моделирования переходных процессов по каналам воздействия на температуру на контрольной тарелке изменением расхода питания (канал возмущения) и изменением расхода теплового потока в куб колонны (канал управления) по известным методикам получены нормированные передаточные функции $W_{ov}(S)$ и $W_{ov}(S)$, а из условия инвариантности получены передаточные функции компенсаторов для колонн К-3 и К-4. Они представлены в виде (1, 2) соответственно:

$$W_{\kappa}(S) = -\frac{W_{ov}(S)}{W_{ov}(S)} = 0,45 \frac{2200S + 1}{2909S + 1} e^{-100S}, \quad (1)$$

$$W_{\kappa}(S) = -\frac{W_{ov}(S)}{W_{ov}(S)} = 0,38 \frac{91,2S + 1}{94,3S + 1}. \quad (2)$$

Переходные процессы в блоке экстрактивной ректификации

На рис. 4 и 5 для ступенчатого воздействия $\pm 10\%$ по расходу питания в головную колонну К-1 отображены отклики в виде изменения соответственно: температуры на контрольной тарелке в колонне К-3 и массового содержания изопрена в кубовом продукте колонны К-3.

На рис. 6–8 для ступенчатого воздействия $\pm 10\%$ по расходу питания в головную колонну К-1 отображены отклики в виде изменения соответственно: температуры на контрольной тарелке колонны К-4 (ΔT_{10}), расхода изопрена в виде расхода дистиллята колонны К-4 и массовой доли изопрена в дистилляте колонны К-4. Моделирование переходных функций колонн по каналу возмущения и управления, а также откликов на возмущение по расходу питания в К-1, выполнялось в программной среде UniSim [8].

Таблица 4

Настроечные параметры регуляторов блока колонн К-3 и К-4

Позиция на схеме	Наименование	Коэффициент усиления K	Время изодрома T_p , мин
1, 12	Регулятор соотношения расходов	0,1	0,2
2, 8	Регулятор давления	2	0,2
3, 6	Регулятор уровня	4	6
4	Регулятор соотношения расходов	0,15	0,1
5	Регулятор температуры	3,4	0,6
7	Регулятор расхода	0,15	0,1
9, 11	Регулятор уровня	4	4
10	Регулятор температуры	2,4	0,3

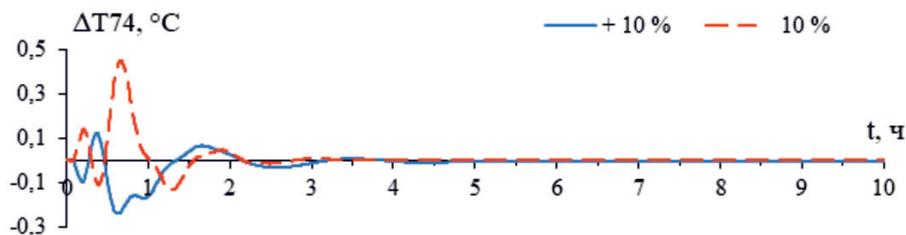


Рис. 4. Отклик температуры на контрольной тарелке в К-3

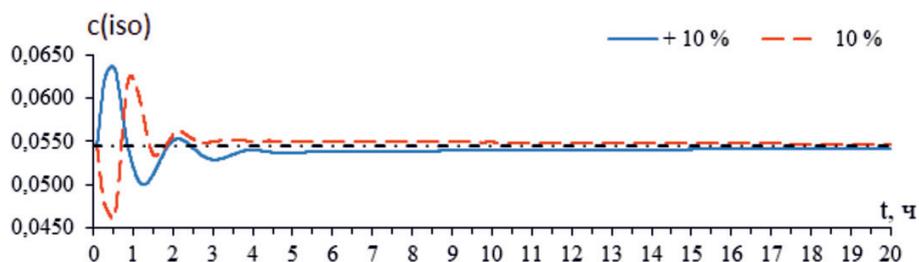


Рис. 5. Отклик содержания изопрена в кубовом продукте К-3

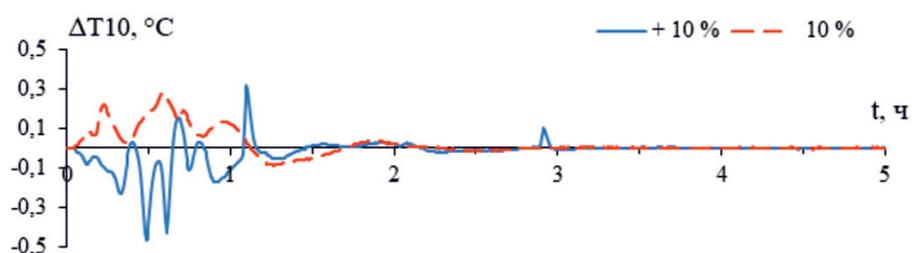


Рис. 6. Отклик изменения температуры на контрольной тарелке в К-4

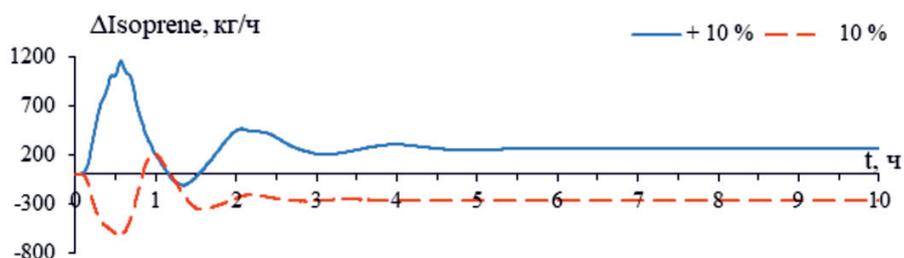


Рис. Рис. 7. Отклик изменения расхода изопрена

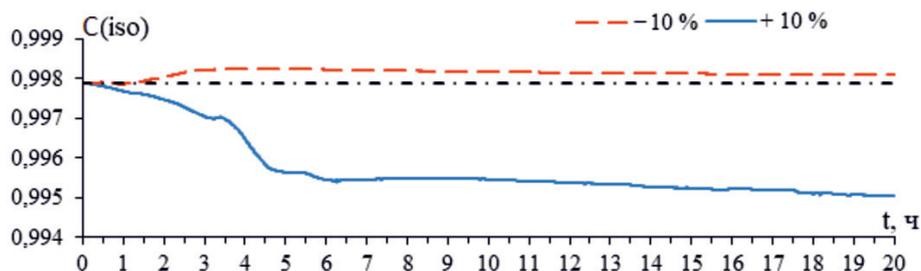


Рис. 8. Отклик содержания изопрена в дистилляте колонны К-4

Из переходных процессов, изображённых на рис. 4–7, следует, что изменение знака возмущения в головную колонну влияет на частоту колебаний в системе. Изменение полярности возмущения по расходу питания в головную колонну влияет на длительность переходных процессов в системе. При возмущении в сторону увеличения расхода питания в колонну К-1 переходной процесс в системе составляет 5,5 ч, а при возмущении в сторону уменьшения переходной процесс в системе составляет 3 ч.

Выводы

На основе результатов минимизации энергетических затрат в статическом состоянии четырёхколонной ректификационной установки (К-1, К-2, К-3, К-4) при получении изопрена требуемого качества с учётом результатов ранее выполненного синтеза системы управления колоннами К-1 и К-2 синтезирована система управле-

ния блоком колонн К-3 и К-4 с использованием среды UniSim Design.

Результаты работы подтверждают достижение цели исследования: получение устойчивой системы управления четырёхколонной ректификационной установкой для получения изопрена требуемого качества в режиме энергосбережения.

При анализе графиков переходных процессов по рассмотренным каналам передачи воздействий на промежуточные переменные наблюдается изменение формы этих процессов при смене знака воздействия равного по величине, что свидетельствует о нелинейности ректификационной установки по выделению изопрена.

Выполнение исследований при синтезе системы оптимального управления многоколонной ректификационной установкой по выделению изопрена с использованием среды UniSim Design позволило установить существенное влияние знака

ступенчатого возмущающего воздействия в головную колонну на частотный спектр и на длительность переходного процесса в системе управления до получения конечного продукта.

Список литературы

1. Гималаев М.К. Анализ особенностей динамического поведения ректификационных колонн с целью разработки энергосберегающих систем управления // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 16. № 15. С. 251–253.
2. Sigurd Skogestad. Dynamics and control of distillation columns – a critical survey. Modeling, identification and control. 1997. vol. 18. no. 3. P. 177–217.
3. Елизаров В.И., Мерзляков С.А., Шавалеев Р.Р. К построению систем управления процессом ректификации // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 11. С. 177–180.
4. Абзалилова Л.Р. Традиционные и инновационные материалы в промышленности синтетических каучуков в России и мире: учебное пособие. Казань: КНИТУ, 2013. 148 с.
5. Башкатов Т.В., Жигалин Я.Л. Технология синтетических каучуков: учебник для техникумов: 2-е изд. Л.: Химия, 1987. 360 с.
6. Кривошеев В.П., Ануфриев А.В., Реутов В.А., Филимонцев Е.А., Пугачева Н.В. Моделирование и оптимизация системы выделения изопрена из фракции углеводородов C₅ пиролиза // Фундаментальные исследования. 2018. № 12–1. С. 25–30.
7. Кривошеев В.П., Филимонцев Е.А., Ефимов И.М. Синтез системы управления ректификационными колоннами К-1 и К-2 в производстве изопрена. // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 12. С. 68–72.
8. UniSim Design Suite – Free Trial of Simulation Software Now Available [Electronic resource]. URL: <https://www.honeywell-process.com/en-US/explore/products/advanced-applications/unisim/Pages/unisim-design-suite.aspx> (date of access: 01.04.2020).