

УДК 66.011

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЁННЫХ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН

Кривошеев В.П., Дмитриев Д.А., Ефимов И.М.

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, e-mail: efimov.im@dvfu.ru

В статье решается задача статической оптимизации на примере двух последовательно соединённых колонн в системе выделения изопробилбензола из продуктов алкилирования бензола пропиленом. Особенность цели оптимизации заключается в поиске компромиссного решения по снижению энергетических затрат, с одной стороны, и увеличению отбора продуктового потока требуемого качества, с другой стороны. Объектом исследования является двухколонная ректификационная установка, состоящая из колонн К-50 и К-70. В колонне К-50 с дистиллятом отгоняются пропан, гексан и бензол, а в колонне К-70 с кубовым продуктом отгоняются полиалкилбензол и смолы. Выполнена статическая оптимизация в виде нахождения компромиссного решения по двум критериям оптимальности для каждой из колонн. Критерии оптимизации отражают затратную составляющую в виде тепловых потоков в каждую из колонн и производительность этих колонн в виде отборов продуктов, несущих целевой компонент. В основе метода для определения компромиссного решения лежит достижение равных значений относительных единиц степени достижения минимального парового потока и степени достижения максимального отбора продукта, несущего целевой компонент, для каждой из колонн. В процессе поиска выходной поток первой колонны в виде кубового продукта является сырьём второй колонны, где выполняется поиск компромиссного решения этой колонны. Приведены результаты компромиссного решения и предложена структура системы управления, поддерживающей компромиссные режимы этих колонн.

**Ключевые слова:** ректификационная колонна, изопробилбензол, компромиссное решение

## MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF SERIES-CONNECTED DISTILLATION COLUMNS

Krivosheev V.P., Dmitriev D.A., Efimov I.M.

Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: efimov.im@dvfu.ru

The paper solves a static optimization problem by the example of two series-connected columns in the system of isopropyl benzene extraction from benzene alkylation products with propylene. A peculiarity of optimization purpose is finding of compromise solution for minimization of energy consumption, on the one hand, and increasing of product stream extraction of required quality, on the other hand. The object of investigation is two-column rectification unit, consisting of columns K-50 and K-70. In column K-50 propane, hexane and benzene are distilled with distillate and in column K-70 polyalkylbenzene and tar are distilled with cube product. The static optimization in a form of finding compromise solution by two optimality criteria for each of the columns was carried out. Optimization criteria reflects cost component in the form of heat fluxes to each of the columns and performance of these columns in the form of product withdrawals carrying the target component. The method for determining the compromise solution is based on achieving equal values of the relative units of the degree of achieving the minimum steam flow and the degree of achieving the maximum product withdrawal carrying the target component, for each of the columns. In the process of searching the output stream of the first column in the form of cube product is the raw material of the second column, where the compromise solution of this column is found. The results of compromise solution are presented and the structure of control system supporting compromise modes of these columns is proposed.

**Keywords:** rectification column, isopropylbenzene, compromise solution

Современная системная инженерия химических производств сталкивается с возрастающими требованиями и одновременно возможностями для более эффективных стратегий моделирования и оптимизации как статических, так и динамических режимов технологических процессов. Эти проблемы и усилия, направленные на их решение, непосредственно связаны с задачами оптимального проектирования, управления и исследования химико-технологических процессов и производств с целью рационального использования энергетических и сырьевых ресурсов, обеспечения безопасности и охраны окружающей среды и устойчивого развития [1–3].

В данной работе для колонны К-50 решается задача двухкритериальной оптимизации с критериями оптимальности: энергетические затраты на процесс, оцениваемые расходом парового потока, и отбор кубового продукта с концентрацией в нём бензола не выше заданной. Для колонны К-70 решается задача двухкритериальной оптимизации с критериями оптимальности: энергетические затраты на процесс, оцениваемые расходом парового потока, и отбор дистиллята с концентрацией теряемого изопробилбензола с кубовым продуктом не выше заданной.

Для получения компромиссного решения для каждой из ректификационных

колонн в качестве начального значения парового потока принималось минимальное значение, вычисленное из условия провала жидкости на нижележащую тарелку. Нарушение этого условия приводит к протеканию большого количества жидкой фазы, не вступившей в контакт с паровой фазой, что в значительной степени снижает эффективность работы тарелок. Минимальные значения паровых потоков колонн, приемлемые для поиска компромиссных решений, вычислены по методике [3–6]. При базовых значениях расхода и состава питания в головную колонну они составляют соответственно: для колонны К-50 – 51975 кг/ч и для колонны К-70 – 19531 кг/ч.

#### Материалы и методы исследования

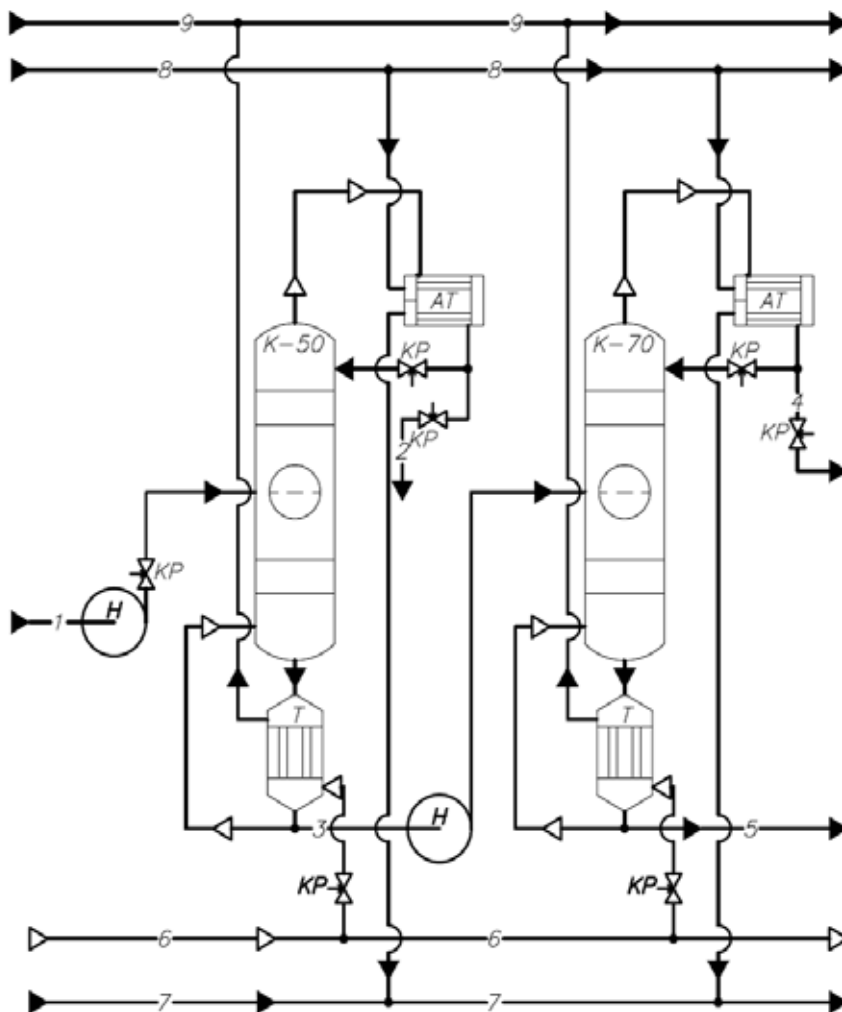
Объектом исследования является двух-колонная ректификационная установка, со-

стоящая из колонн К-50 и К-70 (рисунок). В колонне К-50 с дистиллятом отгоняются пропан, гексан и бензол, а в колонне К-70 с кубовым продуктом отгоняются полиалкилбензол и смолы. На рисунке представлена принципиальная технологическая схема установки.

В колонну К-1, состоящую из 66 теоретических тарелок, питающая смесь с расходом 58400 кг/ч подаётся на 36 тарелку. Давление в веру колонны составляет 149 Кпа, а в низу колонны – 214 Кпа. Состав питания показан в табл. 1.

В качестве полиалкилбензола принят 1,4-диизопропилбензол, а в качестве смол – додецилбензол.

Кубовый продукт колонны К-1 направляется на 47 тарелку колонны К-2, имеющей 60 тарелок. Давление в веру колонны составляет 26 кПа, а в низу колонны – 45 кПа.



Технологическая схема установки:

1 – исходная смесь, 2 – бензольная фракция, 3 – тяжелая фракция, 4 – кумольная фракция, 5 – смолы, 6 – греющий пар, 7 – охлаждающая вода, 8 – охлаждающая вода, 9 – конденсированный пар

Таблица 1

Состав питания колонны К-50

Компонент	Пропан	Гексан	Бензол	Этил-бензол	Изопропил-бензол (ИПБ)	Бутил-бензол	Полиалкил-бензол	Смолы
Концентрация компонента, мас. %	0,24	0,13	51,1	0,3	33,77	0,24	13,52	0,72

Решается задача получения компромиссного решения по максимизации отбора продуктов, содержащих целевой продукт (изопропилбензол), и минимизации энергетических затрат, оцениваемых величинами паровых потоков в колоннах. Для получения компромиссного решения использован метод многокритериальной оптимизации [4]. Сущность используемого метода состоит в том, что при заданных условиях ведения технологического процесса отыскиваются значения оценок выбранных критериев оптимальности в виде степеней достижения цели  $u_i$  для каждого из критериев

$$u_i = \frac{f_i - F_{i \min}}{F_{i \max} - F_{i \min}}, \quad (1)$$

где  $f_i$  – текущее значение частного критерия оптимальности,  $F_{i \max}$  – максимальное значение частного критерия оптимальности,  $F_{i \min}$  – минимальное значение частного критерия оптимальности.

Выбирается начальная точка поиска, соответствующая минимальной степени достижения цели одного  $u_i$  из всех частных критериев  $u_j$  в заданном диапазоне варьирования переменных. Далее выполняется движение в направлении повышения степени достижения цели выбранного критерия. Поиск заканчивается при выполнении условия

$$\varepsilon = |u_i - u_j| \rightarrow \min. \quad J = 1, 2, \dots \quad J \neq i \quad (2)$$

Выбор метода решения задачи (2) зависит от числа степеней свободы и характера влияния варьируемых переменных на функцию (2).

В данной работе для колонны К-50 выполнена двухкритериальная оптимизация с критериями оптимальности: энергетические затраты на процесс, оцениваемые расходом парового потока, и отбор кубового продукта с концентрацией в нём бензола не выше заданной. Для колонны К-70 решается задача двухкритериальной оптимизации с критериями оптимальности: энергетические затраты на процесс, оцениваемые расходом парового потока, и отбор дистиллята с концентрацией теряемого изопробилбензола с кубовым продуктом не выше заданной. Учитывая наличие только двух

критериев оптимальности на каждом этапе решения задачи, условие (2) переходит в равенство

$$f(u_1, u_2) = u_1 - u_2 = 0 \quad (3)$$

Моделирование статических режимов рассматриваемой технологической установки выполнено с использованием программного продукта UNISIM [5, 6] в 5% диапазоне с шагом 1% относительно базовых значений расхода и состава питания в головную колонну К-50. Варьирование состава питания выполнялось путём варьирования условно бинарной смеси. В лёгкую фракцию включены: пропан, гексан, бензол и изопропилбензол. Тяжелую фракцию составляли: бутилбензол, полиалкилбензол и смолы.

Доли индивидуальных компонентов при варьировании условно бинарной смеси питания вычислялись:

для легколетучих компонентов:

$$c_i = z_n \times c_{in}, \quad (4)$$

для труднолетучих компонентов:

$$c_j = (1 - z_n) \times c_{jt}, \quad (5)$$

где  $z_n$  – доля лёгкой фракции в питании,  $c_{in}$  – доля  $i$ -го легколетучего компонента в питании для базового режима;  $c_i$  – доля  $i$ -го легколетучего компонента в питании до варьирования состава питания;  $c_{jt}$  – доля  $j$ -го труднолетучего компонента в питании для базового режима;  $c_j$  – доля  $j$ -го труднолетучего компонента в питании до варьирования состава питания.

При моделировании статических режимов колонн К-50 и К-70 были использованы следующие спецификации, обеспечивающие минимальные потери целевого продукта (изопропилбензола): для К-50 – расход парового потока и содержание изопробилбензола в дистилляте, равное 0,00001 мас. дол. а для К-70 – расход парового потока и содержание изопробилбензола в кубовом продукте, равное 0,00001 мас. дол.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В результате моделирования статических режимов колонн установлено, что при заданных концентрациях теряемого

изопропилбензола расходы продуктовых потоков, несущих целевой компонент, возрастают при увеличении парового потока в колоннах.

В связи с этим поиск компромиссного решения сводится к выполнению условия (3) для каждой из колонн. Учитывая нелинейность функций (3) от паровых потоков соответствующих колонн, решение задачи сводится к отысканию корня нелинейного уравнения. В данной работе применён метод сканирования [4]. На основании отмеченного свойства статических режимов колонн начало поиска компромиссного решения нужно выполнять с минимальных значений степеней достижения целей по отбору продуктовых потоков из колонн, соответствующих минимальным паровым потокам в колоннах.

Для базового статического режима колонн найдены контрольные тарелки, обладающие наибольшей чувствительностью к возмущающим и управляющим воздействиям. Получены 17 и 14 тарелки соответственно для колонны К-50 и для колонны К-70. Выборка из результатов многокритериальной оптимизации в виде 12 компромиссных решений из 5% диапазона изменения расхода и состава питания в колонну К-50 от базовых значений приведена в табл. 2.

Из анализа полученных результатов следует, что при изменении расхода питания в колонну К-50 в сторону увеличения наблюдается увеличение на 0,09 степени достижения экстремума по расходу кубового продукта из колонны К-50 и степени достижения экстремума по паровому потоку этой колонны. При увеличении содержания лёгкой фазы в питании колонны К-50 наблюдается уменьшение степеней достижения указанных выше экстремумов на 0,1. Увеличение расхода питания в колонну К-50 вызывает увеличение степени достижения экстремумов по паровому потоку и по отбору дистиллята из колонны К-70 на 0,11. Увеличение содержания лёгкой фазы в питании колонны К-50 вызывает снижение степеней достижения указанных выше экстремумов для колонны К-70 на 0,06. При этом для базовых значений расхода и состава питания в колонну К-50 степени достижения экстремумов для колонн К-50 и К-70 составили 0,278 и 0,842 соответственно. Этот результат свидетельствует о большем запасе по диапазону возможного варьирования управляющих воздействий колонны К-50 по сравнению с колонной К-70 при изменении условий компромиссного режима функционирования этих колонн.

Таблица 2

Результаты расчета компромиссных режимов колонн К-50 и К-70

Питание колонны К-50		Колонна	Параметры компромиссных решений						
Расход питания в колонну К-50, кг/ч	Доля легкой фракции в питании колонны К-50		Расход дистиллята, кг/ч	Расход греющего пара, кг/ч	Расход кубового продукта, кг/ч	Температура на контрольной тарелке, °С	Степень достижения экстремума по расходу парового потока	Степень достижения экстремума по расходу кубового продукта	Степень достижения экстремума по расходу дистиллята
55480	0,514	К-50	28548	67097	26932	137,52	0,232	0,231	–
58400	0,514		30064	66534	28336	140,12	0,279	0,278	–
61320	0,514		31694	66005	29626	142,46	0,319	0,320	–
58400	0,489		28598	65940	29802	142,86	0,326	0,327	–
58400	0,514		30064,	66534	28336	140,12	0,279	0,278	–
58400	0,539		31528	67175	26872	137,44	0,226	0,227	–
55480	0,514	К-70	18912	24455	8020	160,76	0,801	–	0,802
58400	0,514		19923	22732	8413	162,27	0,842	–	0,842
61320	0,514		20949	22232	8677	163,02	0,866	–	0,867
58400	0,489		21161	22251	8640	162,87	0,866	–	0,865
58400	0,514		19923	22732	8413	162,23	0,842	–	0,842
58400	0,539		18868	23625	8003	161,21	0,799	–	0,800

На основании приведённых в табл. 2 материалов предлагается следующая структура системы управления: регулировать расход дистиллятов из колонн К-50 и К-70 по заданиям, сформированным компенсаторами в зависимости от расхода и состава питания в колонну К-50; регулировать температуры на контрольных тарелках колонн К-50 и К-70 изменением расхода греющего пара в кубы колонн в зависимости от расхода и состава питания в колонну К-50 через соответствующие компенсаторы; регулировать уровень во флегмовых ёмкостях колонн изменением расхода флегмы, регулировать уровень в кубах колонн изменением расхода кубовых продуктов.

### Заключение

Для двух последовательно соединённых ректификационных колонн выбран метод многокритериальной оптимизации по энергосбережению и по увеличению отбора продуктовых потоков, несущих целевой компонент. Разработан алгоритм реализации метода многокритериальной оптимизации для двух последовательно соединённых колонн в системе выделения изопробилбензола. Выполнен расчёт и анализ компромиссных решений по энергосбережению уменьшением паровых потоков колонн

и повышению расхода из колонн потоков, несущих целевой продукт – изопробилбензол. На основе анализа компромиссных режимов предложена структура системы управления двумя последовательно соединёнными ректификационными колоннами в системе выделения изопробилбензола

### Список литературы

1. Hsiao Y.D., Kang J.L., Wong D.S.H. Development of robust and physically interpretable soft sensor for industrial distillation column using transfer learning with small datasets. *Processes*. 2021. Т. 9. No. 4. P. 667.
2. Кулов Н.Н., Гордеев Л.С. Математическое моделирование в химической технологии и биотехнологии // *Теоретические основы химической технологии*. 2014. Т. 48. № 3. С. 243–243.
3. Andersen B.B. et al. Integrated process design and control of cyclic distillation columns. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Т. 51. No. 18. P. 542–547.
4. Wang Y.H. Optimization of C5 separation and production process. *Proceedings of the 2014 international conference on economic management and social science*. 2014. Vol. 13. P. 184–188.
5. Tsirlin A.M., Sukin I.A., Balunov A.I. Mathematical model of rectification process and selection of the separation sequence for multicomponent mixtures. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2021. Т. 13. No. 3. P. 483–491.
6. Wang C. et al. Design and control of a novel side-stream extractive distillation column for separating methanol-toluene binary azeotrope with intermediate boiling entrainer. *Separation and Purification Technology*. 2020. Т. 239. P. 116581.