

УДК 660:51.001.57+66

НЕАДИАБАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ЭКСТРАКТИВНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ АЦЕТОН–ХЛОРОФОРМ–*n*-БУТАНОЛ

© 2022 г. Д. Г. Рудаков^а, *, П. С. Клаузнер^а, Е. А. Анохина^а, А. В. Тимошенко^а

^аМИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

*e-mail: rudakov@mirea.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 05.04.2022 г.

Принята к публикации 28.05.2022 г.

Проведена оценка энергетической эффективности применения неадиабатической ректификации в процессе экстрактивной ректификации смеси ацетон–хлороформ–*n*-бутанол с диметилформамидом в качестве разделяющего агента. Рассмотрено два варианта организации теплоинтеграции: 1) между колонной регенерации разделяющего агента и экстрактивной колонной; 2) между колонной регенерации, экстрактивной колонной и колонной выделения хлороформа. Показано, что применение схем неадиабатической ректификации позволяет снизить приведенные энергетические затраты на 7.4–12.7% при теплоинтеграции между колоннами экстрактивной ректификации и регенерации диметилформамида, а в случае теплоинтеграции всех колонн схемы – до 20%, по сравнению с исходной схемой.

Ключевые слова: экстрактивная ректификация, неадиабатическая ректификация, ацетон, хлороформ, *n*-бутанол, теплоинтеграция, энергосбережение

DOI: 10.31857/S0040357122050189

ВВЕДЕНИЕ

Экстрактивная ректификация (ЭР) – наиболее широко распространенный метод разделения азеотропных смесей и смесей компонентов с относительной летучестью близкой к 1. Известно, что данный метод, также как и обычная ректификация, обладает низкой термодинамической эффективностью, и, как следствие, является крупным потребителем тепловой энергии. Повышение энергоэффективности процесса ректификации позволяет получить существенный экономический эффект, поэтому в химической технологии данному вопросу уделяется большое внимание. Один из подходов к снижению энергозатрат предполагает передачу тепла, отводимого из укрепляющей секции колонны, в отгонную секцию той же колонны. Однако его реализация требует искусственного повышения температуры потоков за счет их сжатия. На базе этой концепции предложено достаточно много различных вариантов схем ректификации с теплоинтеграцией. Самым простым и очевидным вариантом внешней тепловой интеграции являются схемы с тепловым насосом [1–5].

В качестве альтернативы схемам с тепловым насосом были предложены схемы с применением внутренней теплоинтеграции [6, 7], называемые в англоязычной литературе “HIDiC”, которые со-

четают в себе концепцию схем с тепловым насосом и преимущества схем неадиабатической ректификации. Вместо передачи теплоты с верха колонны в куб, как в тепловом насосе, теплопередача в HIDiC осуществляется между тарелками отгонной и укрепляющей секций колонны, обеспечивая непрерывный ступенчатый подвод или отвод теплоты в каждой из секций. В этом случае, для обеспечения положительной разности температур между соответствующими тарелками, укрепляющая секция должна работать при более высоком давлении, чем отгонная секция. Концепция внутренней теплоинтеграции подробно рассмотрена авторами [8] в 1977 г., а первые работы, посвященные этому вопросу, были опубликованы еще раньше [9, 10]. Преимущества ряда схем с HIDiC были подтверждены, в том числе, и экспериментально [11]. Авторами [12] показано, что, с термодинамической точки зрения, конфигурации HIDiC могут быть более эффективными, чем схемы с тепловым насосом. Однако они пока не нашли широкого применения в промышленности из-за сложности организации эффективного теплообмена между двумя секциями колонны. Для решения этой проблемы предлагается использовать концентрические, многотрубные, разделенные перегородками с теплообменными панелями [13] или иные [14] конфигурации. Дополнительные трудности практической реализации схем с

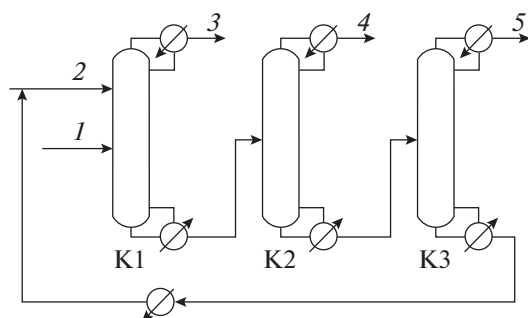


Рис. 1. Традиционная схема ЭР из двухотборных колонн: К1 – экстрактивная колонна, К2 – колонна выделения хлороформа, К3 – колонна регенерации ДМФА 1 – исходная смесь, 2 – разделяющий агент, 3 – ацетон, 4 – хлороформ, 5 – *n*-бутанол.

НIDiC связаны со сложной управляемостью процесса [15, 16], особенно в случае организации теплоинтеграции между паровым потоком дистиллята и питанием колонны [17, 18].

В качестве альтернативы схемам с тепловым насосом или с внутренней теплоинтеграцией можно предложить схемы неадиабатической ректификации, которые подразумевают внешний подвод (или отвод) теплоты на тарелки колонн за счет интеграции тепла потоков между различными аппаратами схемы. В этом случае нет необходимости в создании конструктивно сложных и дорогих аппаратов – для организации теплоинтеграции достаточно установить обычные циркуляционные теплообменники. Применение схем неадиабатической экстрактивной ректификации в настоящее время рассмотрено явно недостаточно [19]. В данной работе проведена оценка энергетической эффективности применения неадиабатической ректификации в схеме разделения смеси

Таблица 1. Оптимальные рабочие параметры традиционной схемы ЭР из двухотборных колонн [20]

Колонны	К1	К2	К3
N_{sum}	22	30	44
N_F	8	10	13
N_S	4	–	–
Q_{reb} , кВт	342.3	136.7	526.3
Q_{cond} , кВт	–211.6	–131.7	–526.7
R	1.09	12.35	22.20
T_{cond} , °C	56.1	61.1	117.3
T_{reb} , °C	144.9	149.6	151.6
S, кг/ч	2180	–	–
T_S , °C	60	–	–
Q_{sum} , кВт		1005.3	

ацетон–хлороформ–*n*-бутанол с диметилформамидом в качестве разделяющего агента.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Методы исследования. В качестве основного метода исследования применяли математическое моделирование и вычислительный эксперимент, все расчеты проводили в программном комплексе *AspenPlus v.12.1*. Моделирование и оптимизация традиционной схемы (Рис. 1) ЭР смеси ацетон–хлороформ–*n*-бутанол с диметилформамидом были проведены авторами работы [20], эти данные были взяты нами в качестве исходных (табл. 1) для разработки схем неадиабатической ректификации.

В качестве модели описания парожидкостного равновесия в системе ацетон–хлороформ–*n*-бутанол–диметилформамид выбрано уравнение NRTL с параметрами, опубликованными авторами [20].

Одним из ключевых условий для организации схем неадиабатической ректификации является положительная разность температуры потока, теплоту которого предполагается использовать (источник тепла), и температуры на тарелках отгонной секции колонн, в которые это тепло направлено (приемник тепла). Эта разность температур должна обеспечить достаточную движущую силу процесса теплообмена. Исходя из этого, при моделировании схем ΔT между источником и приемником тепла принимали равной не менее 10°C. С целью достижения наилучших условий теплопередачи выбирали такой режим работы теплообменника, чтобы в нем происходила полная конденсация потока пара с горячей стороны, и испарение жидкости с холодной. Для предварительной оценки возможности реализации схемы неадиабатической экстрактивной ректификации с заданными параметрами теплообмена и выбора необходимой степени сжатия E в компрессоре, были построены температурные профили для всех колонн (Рис. 2) традиционной схемы.

Видно, что наиболее высокие температуры наблюдаются в укрепляющей секции колонны К3, следовательно, именно теплоту потока пара, выходящего с ее верха, целесообразно использовать для обогрева отгонных секций других колонн схемы. Здесь можно рассмотреть несколько вариантов теплоинтеграции:

1) между колоннами К3 и К1 посредством установки одного теплообменника (рис. 3а). Колонна К1 выбрана исходя из того, что затраты тепла в ее кипятильнике вносят более существенный вклад в общие энергозатраты схемы, чем энергозатраты в кипятильнике колонны К2;

2) между колоннами К3 и К1 посредством установки двух теплообменников (организация

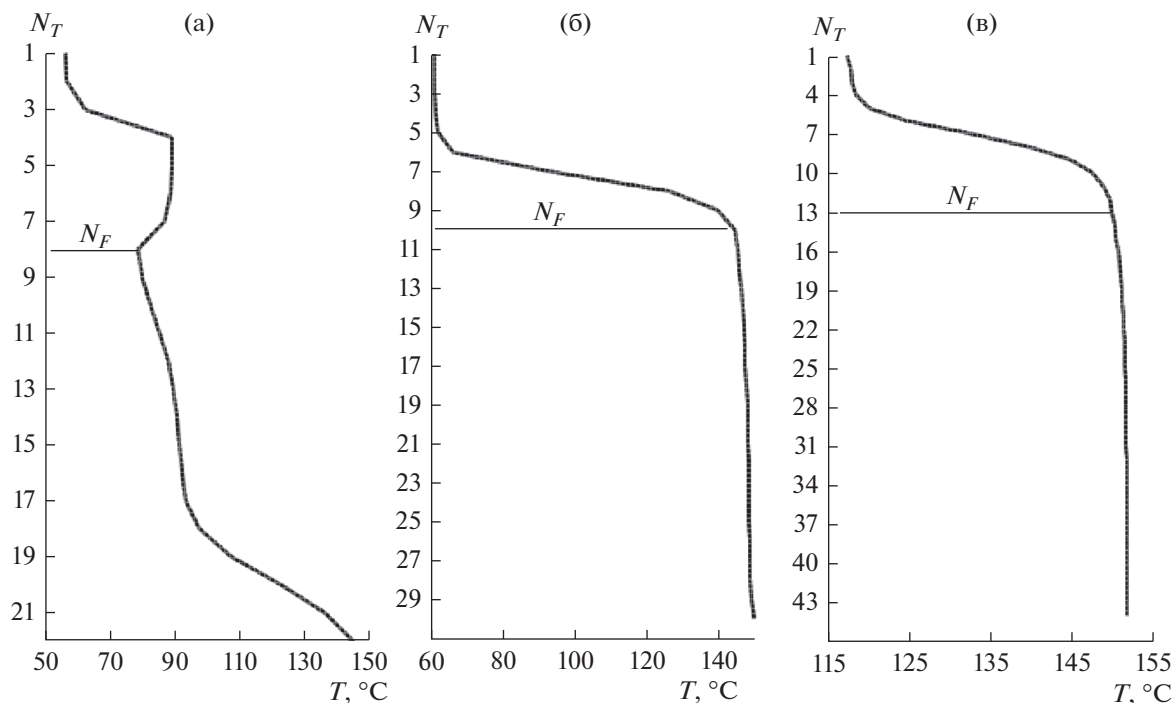


Рис. 2. Профили температур по высоте колонн схемы ЭР из двухотборных колонн: а – экстрактивная колонна К1, б – колонна выделения хлороформа К2, в – колонна регенерации К3, N_T – номер тарелки, N_F – тарелка питания.

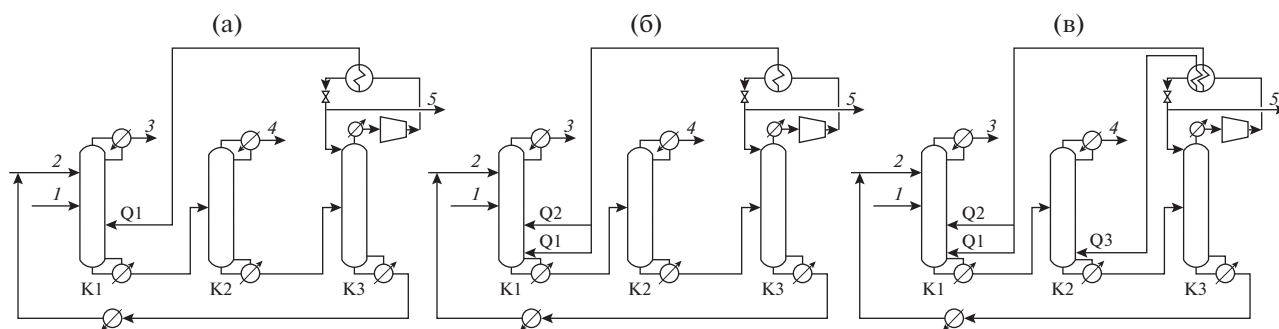


Рис. 3. Неадиабатические схемы ЭР: 1 – исходная смесь, 2 – разделяющий агент, 3 – ацетон, 4 – хлороформ, 5 – *n*-бутанол.

ступенчатого подвода тепла для устранения зон возможного перегрева на тарелках, рис. 3б);

3) между колоннами К3 и К1 + К2, что является наиболее полным вариантом теплоинтеграции (рис. 3в).

Температура парового потока, выходящего с верха колонны К3 равна 117.3°C. Этого недостаточно для организации теплоинтеграции с отгонными секциями колонн К1 и К2 (см. рис. 2). Поэтому требуется установка компрессора с минимальной рабочей степенью сжатия $E = 2.5$ для вариантов (1) и (2) и степенью сжатия $E = 3.0$ для варианта (3), при этом температура потока пара после сжатия будет равна 155.1 и 164.2°C, соответ-

ственно. Для предотвращения возможной кавитации в компрессоре перед ним установлен дополнительный подогреватель, тепловая нагрузка которого обозначена Q_{PH} .

Определение оптимальных значений номера тарелки расположения циркуляционного теплообменника (N_{HE}) и количества пропускаемой через него жидкости (SD_{HE}), производили посредством комбинации методов последовательно квадратичного программирования и утилиты автоматического перебора *Sensitivity Analysis*, встроенных в программный комплекс *Aspen Plus*. Критерий оптимизации – энергозатраты в кипятильниках колонн Q_{reb} .

Таблица 2. Определение N_{HE} и SD_{HE} для варианта теплоинтеграции (1) в колонне К1

N_{HE}	SD_{HE} , кг/ч	Q_{HE} , кВт	R	Q_{cond} , кВт	Q_{reb} , кВт
15	2815.2	415.5	2.46	-350.1	65.2
16	2650.9	390.7	2.21	-324.5	64.4
17	2406.7	354.5	1.85	-287.8	63.9
18	2276.1	335.1	1.66	-268.7	64.2
19	2162.8	318.5	1.51	-253.5	65.6
20	2056.2	303.1	1.40	-242.3	69.8

Результаты оптимизации N_{HE} и SD_{HE} для варианта теплоинтеграции (1) приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что оптимальной точкой подвода теплоты в колонну К1 является тарелка 17. Поскольку неадиабатические схемы ЭР существенно отличаются от традиционных наличием “горячих” компрессоров, а также дополнительного теплообменного оборудования, то для сопоставления схем целесообразно использовать критерий приведенных энергетических затрат (Q_{cons}) [21]:

$$Q_{cons} = Q_{sum} + 3W_{comp}, \quad (1)$$

где: Q_{sum} – суммарные энергетические затраты в кипятильниках колонн, а W_{comp} – потребляемая компрессором мощность.

Оптимальные рабочие параметры неадиабатической схемы ЭР для варианта теплоинтеграции (1) приведены в табл. 3.

Далее был рассмотрен второй вариант теплоинтеграции, который предполагает подвод теплоты в К1 на два уровня. Результаты определения оптимальной совокупности номеров тарелок подвода теплоты N_{HE}^1 и N_{HE}^2 , а также количества

Таблица 3. Рабочие параметры неадиабатической схемы ЭР для варианта теплоинтеграции (1)

Колонны	К1	К2	К3
N_{sum}	22	30	44
N_{HE}	17	–	–
Q_{reb} , кВт	63.9	136.7	526.3
Q_{cond} , кВт	-287.8	-131.7	-595.4
R	1.85	12.35	21.9
Q_{HE} , кВт	354.5	–	–
$T_{cond/comp}$, °C	56.1	61.1	155.1
T_{reb} , °C	144.9	149.6	151.6
Q_{PH} , кВт	–	–	14.0
E_{comp}	–	–	2.5
W_{comp} , кВт	–	–	63.1
Q_{cons} , кВт		930.2	

отбираемой жидкости SD_{HE}^1 и SD_{HE}^2 для варианта теплоинтеграции (2) приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что оптимальной точкой верхнего подвода теплоты (Q_{HE}^2) в отгонную секцию колонны К1 является тарелка 14. При этом второй (Q_{HE}^1) подвод теплоты оптимально направить на нижнюю тарелку К1. В результате за счет применения теплоинтеграции удалось снизить энергозатраты в кипятильнике К1 на 96.7%. Оптимальные рабочие параметры неадиабатической схемы ЭР для варианта теплоинтеграции (2) приведены в табл. 5.

На следующем этапе работы был рассмотрен вариант теплоинтеграции, максимально возможный для исследуемой схемы ЭР. Он предполагает двухуровневый подвод теплоты в К1 и подвод теплоты в К2. Оптимальные рабочие параметры экстрактивной колонны К1 были такими же, как во втором варианте теплоинтеграции. Процедура оптимизации колонны К2 в целом аналогична процедуре, рассмотренной для колонны К1. Отметим, что при реализации теплоинтеграции с колонной К2 появляется ряд ограничений. Во-первых, распределение температур в К2 не позволяет использовать прежнюю степень сжатия в компрессоре, ее необходимо повысить до $E = 3$. При этом возрастает мощность компрессора и тепловая нагрузка его вспомогательного предварительного нагревателя. Однако с 595 до 615 кВт возрастает и количество теплоты, которое можно направить для обогрева отгонных секций колонн К1 и К2. На обогрев колонны К1 при выбранном режиме ее работы расходуется 477 кВт, следовательно, на обогрев К2 можно направить не более 138 кВт. Исходя из этого было определено количество отбора жидкости $SD_{HE}^3 = 900$ кг/ч, циркулирующей через теплообменник с тем условием, чтобы количество теплоты на ее полное испарение не превысило 138 кВт. Определение оптимальной тарелки подвода теплоты (N_{HE}^3) при фиксированном SD_{HE}^3 для колонны К2 приведено в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что подвод теплоты в К2 оптимально направить на нижнюю тарелку, что

Таблица 4. Определение N_{HE}^1 , N_{HE}^2 и SD_{HE}^1 , SD_{HE}^2 для варианта теплоинтеграции (2) в колонне К1

N_{HE}^2	N_{HE}^1	SD_{HE}^1 , кг/ч	SD_{HE}^2 , кг/ч	Q_{HE}^1 , кВт	Q_{HE}^2 , кВт	R	Q_{cond} , кВт	Q_{reb} , кВт
13	19	892	2552	132.1	364.1	3.02	-406.5	41.0
	20	965	2641	143.3	375.6	3.10	-414.9	26.6
	21	965	2640	142.1	375.4	3.11	-415.7	27.8
14	19	864	2221	127.8	316.9	2.56	-359.9	45.8
	20	914	2299	135.6	326.3	2.60	-364.2	33.0
	21	1025	2292	152.6	324.4	2.54	-357.7	11.4
15	19	828	1948	122.3	280.2	2.19	-322.7	50.8
	20	846	2012	125.3	287.1	2.18	-321.5	39.7
	21	963	2056	143.2	291.2	2.21	-325.0	21.3

обеспечит снижение нагрузки на ее кипятильник на 96.4% за счет теплоинтеграции между колоннами К3 и К2 и перехода к неадиабатической ректификации. В этом случае организации второй точки подвода теплоты (как это было для аппарата К1) не требуется. Итоговые оптимальные рабочие параметры неадиабатической схемы ЭР (вариант 3) приведены в табл. 7.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе проведенных исследований были рассмотрены три различных варианта теплоинтеграции между колоннами схемы ЭР смеси ацетон-хлороформ-*n*-бутанол с диметилформамидом в качестве разделяющего агента. Сопоставление предложенных схем неадиабатической ректификации с традиционной схемой ЭР из двухотборных колонн по критерию приведенных энергозатрат представлено в табл. 8. Снижение приведенных энергозатрат ΔQ_{cons} рассчитывали по формуле:

$$\Delta Q_{cons} = (Q_{sum} - Q_{cons}) / Q_{sum} \times 100\%, \quad (2)$$

где: Q_{sum} – суммарные энергетические затраты в кипятильниках колонн традиционной схемы ЭР, а Q_{cons} – приведенные энергозатраты схемы с теплоинтеграцией.

Из табл. 8 видно, что максимальное снижение приведенных энергозатрат обеспечивает вариант (3) неадиабатической схемы ЭР, который предполагает организацию теплоинтеграции колонны К3 с колоннами К2 и К1. Вместе с этим в колонне К1 возрастает флегмовое число и нагрузка на конденсатор, чего практически не наблюдается в колонне К2. Это объясняется тем, что при организации дополнительного подвода теплоты в отгонную часть экстрактивной колонны К1 снижается концентрация разделяющего агента ДМФА в жидкой фазе в экстрактивной секции (с 4 по 8 тарелки, см. рис. 4) примерно на 15% для варианта

теплоинтеграции (1) и на 26% – для вариантов теплоинтеграции (2) и (3).

Такое снижение концентрации ДМФА в жидкой фазе приводит к некоторому ухудшению режима работы экстрактивной колонны, и для обеспечения заданного качества продуктовых потоков требуется повышение флегмового числа. Рост флегмового числа приводит к увеличению необходимого парового потока в колонне и, следовательно, к росту энергозатрат в конденсаторе. В свою очередь, увеличение парового потока в колонне приводит и к росту суммарного количества подвода теплоты, требуемого для его создания, на 18% для варианта теплоинтеграции (1) и на 30% – для варианта теплоинтеграции (2).

Таблица 5. Рабочие параметры неадиабатической схемы ЭР для варианта теплоинтеграции (2)

Колонны	К1	К2	К3
N_{sum}	22	30	44
N_{HE}^1	21	–	–
N_{HE}^2	14	–	–
Q_{reb} , кВт	11.4	136.7	526.3
Q_{cond} , кВт	-357.7	-131.7	-595.4
R	2.54	12.35	21.9
Q_{HE}^1 , кВт	152.6	–	–
Q_{HE}^2 , кВт	324.4	–	–
$T_{cond/comp}$, °C	56.1	61.1	155.1
T_{reb} , °C	144.9	149.6	151.6
Q_{RH} , кВт	–	–	14.0
E_{comp}	–	–	2.5
W_{comp} , кВт	–	–	63.1
Q_{cons} , кВт		877.7	

Таблица 6. Определение SD_{HE}^3 в К2 для варианта теплоинтеграции (3)

N_{HE}^3	R	Q_{cond} , кВт	Q_{reb} , кВт
25	14.23	-149.7	18.4
26	13.81	-145.6	14.2
27	13.44	-142.0	10.7
28	13.13	-138.9	7.6
29	12.85	-136.2	4.9

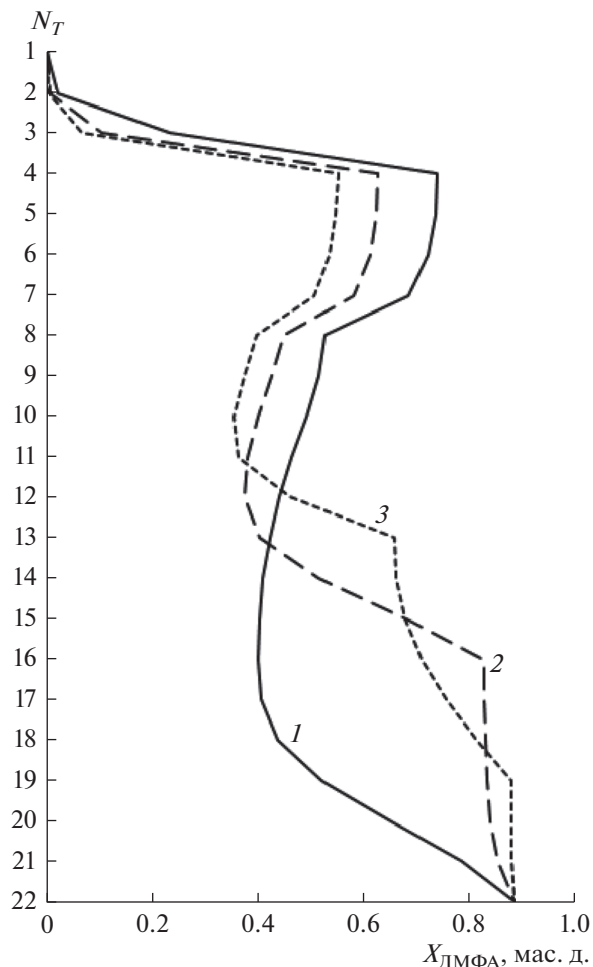
Таблица 7. Рабочие параметры неадиабатической схемы ЭР для варианта с максимальной теплоинтеграцией

Колонны	К1	К2	К3
N_{sum}	22	30	44
$N_{HE}^{1(3)}$	21	29	—
N_{HE}^2	14	—	—
Q_{reb} , кВт	11.4	4.9	526.3
Q_{cond} , кВт	-357.7	-136.2	-614.7
R	2.54	12.85	21.9
$Q_{HE}^{1(3)}$, кВт	152.6	136.3	—
Q_{HE}^2 , кВт	324.4	—	—
$T_{cond/comp}$, °C	56.1	61.1	164.2
T_{reb} , °C	144.9	149.6	151.6
Q_{PH} , кВт	—	—	21.0
E_{comp}	—	—	3.0
W_{comp} , кВт	—	—	80.1
Q_{cons} , кВт	—	803.9	—

В случае применения теплоинтеграции технологическая схема несколько усложняется за счет появления дополнительных потоков между аппаратами и за счет использования горячего компрессора. Тем не менее, при выбранной степени сжатия $E = 3$ компрессор может быть одноступенчатым и, следовательно, его стоимость и стоимость технического обслуживания вполне приемлемы.

Таблица 8. Энергетическая эффективность различных вариантов схем ЭР

Вариант схемы	R_{K1}	R_{K2}	Q_{cond}^{K1} , кВт	Q_{cond}^{K2} , кВт	$Q_{cons} (Q_{sum})$, кВт	ΔQ_{cons} , %
Традиционная схема	1.09	12.35	-211.6	-131.7	(1005.3)	—
Вариант (1) с теплоинтеграцией	1.85	12.35	-287.8	-131.7	930.2	7.4
Вариант (2) с теплоинтеграцией	2.54	12.35	-357.7	-131.7	877.7	12.7
Вариант (3) с теплоинтеграцией	2.54	12.85	-357.7	-136.2	803.9	20.0

**Рис. 4.** Профили концентраций ДМФА в жидкой фазе по высоте экстрактивной колонны К1: 1 — традиционная схема, 2 — вариант (1) теплоинтеграции, 3 — варианты (2) и (3) теплоинтеграции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований было установлено, что применение схем неадиабатической ректификации с теплоинтеграцией между различными колоннами позволяет снизить приведенные энергозатраты всей схемы на 7.4–20%. При этом энергозатраты в кипятильнике экстрактивной колонны удается снизить на 96.7%, а

в колонне выделения хлороформа – на 96.4%. Важным преимуществом предложенного варианта схем неадиабатической ректификации является то, что теплоинтеграция осуществляется между различными колоннами схемы, что не требует существенного изменения их конструктивных параметров при модернизации действующих установок.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

<i>E</i>	степень сжатия
<i>N</i>	номер тарелки
<i>P</i>	абсолютное давление, кПа
<i>Q</i>	тепловая нагрузка, кВт
<i>R</i>	флегмовое число
<i>S</i>	расход разделяющего агента, кг/ч
<i>SD</i>	отбор, кг/ч
<i>T</i>	температура, °C
<i>W</i>	потребляемая мощность, кВт
ДМФА	диметилформамид
ЭР	экстрактивная ректификация

ИНДЕКСЫ

comp	компрессор
cond	конденсатор
cons	приведенное значение
F	питание
HE	теплообменник
reb	кипятильник
PH	предподогреватель
S	разделяющий агент
sum	суммарный

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания РТУ МИРЭА, тема № 0706-2020-0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Tao S., Yue L., Haoshui Yu, Yang Ao, Shirui Sun, Weifeng S., Lee K.M., Jingzheng R.* Improved design of heat-pump extractive distillation based on the process optimization and multi-criteria sustainability analysis // *Computers and Chemical Engineering*. 2022. V. 156. P. 107552. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107552>
- Yingguo Xu, Jinlong L., Qing Ye., Yudong Li.* Design and optimization for the separation of tetrahydrofuran/isopropanol/water using heat pump assisted heat-integrated extractive distillation // *Separation and Purification Technology*. 2021. V. 277. P. 119498. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119498>
- Yingguo Xu, Jinlong Li, Qing Ye, Yudong Li.* Energy efficient extractive distillation process assisted with heat pump and heat integration to separate acetonitrile/1,4-dioxane/water // *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. V. 156. P. 144-159. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.042>
- Klauzner P.S., Rudakov D.G., Anokhina E.A., Timoshenko A.V.* Use of Partially Thermally Coupled Distillation Systems and Heat Pumps for Reducing the Energy Consumption in the Extractive Distillation of an Isobutanol–Isobutyl Acetate Mixture Using Dimethylformamide // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2020. V. 54. № 3. P. 397–406. <https://doi.org/10.1134/S0040579520030070>
- Klauzner P.S., Rudakov D.G., Anokhina E.A., Timoshenko A.V.* Optimal modes of side-section flow in heat-pump-assisted extractive distillation systems for separating allyl alcohol–allyl acetate mixtures with butyl propionate // *Fine Chemical Technologies*. 2021. V. 16. № 3. P. 213–224. / <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2021-16-3-213-224>
- Nakaiwa M., Huang K., Endo A., Ohmori T., Akiya T., Takamatsu T.* Internally heat-integrated distillation columns: A review // *Chemical Engineering Research and Design*. 2003. V. 81 (A1). P. 162–177. <https://doi.org/10.1205/026387603321158320>
- Olujić Z., Fakhri F., Rijke A., Graauw J., Jansens P.J.* Internal heat integration: The key to an energy-conserving distillation column // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2003. V. 78. № 2–3. P. 241–248. <https://doi.org/10.1002/jctb.761>
- Mah R.S., Nicholas J.J., Wodnik R.B.* Distillation with secondary reflux and vaporization: A comparative evaluation // *AIChE Journal*. 1977. V. 23. № 5. P. 651–658. <https://doi.org/10.1002/aic.690230505>
- Teynham Woodward. Vapor Reheat Distillation // *Principles of Desalination*. 1966. P. 117–150. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-395660-6.50009-4>
- Walker P.T., Newson I., Johnson K.D.* Development of direct contact flash distillation concepts // *Desalination*. 1967. V. 2. № 7. P. 196–206. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)84137-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)84137-5)
- Naito K., Nakaiwa M., Huang K., Endo A., Aso K., Nakanishi T.* Operation of a bench-scale ideal heat integrated distillation column (HIDiC): An experimental study // *Computers & Chemical Engineering*. 2000. V. 24. № 2–7. P. 495–499. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00513-5](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00513-5)
- Nakaiwa M., Huang K., Owa M., Akiya T., Nakane T., Sato M.* Potential energy savings in ideal heat-integrated distillation column // *Applied Thermal Engineering*. 1998. V. 18. № 11. P. 1077–1087. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00030-1)
- Gadalla M., Jimenez L., Olujić Z., Jansens P.J.* A thermohydraulic approach to conceptual design of an internally heat-integrated distillation column (i-HIDiC) // *Computers and Chemical Engineering*. 2007. V. 31. № 10. P. 1346–1354. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2006.11.006>
- Hugill J.A., Hugill A., Anthony H.J.* System for stripping and rectifying a fluid mixture. World Patent WO2003011418-A, 2003.

15. Nakaiwa M., Huang K., Owa M., Akiya T., Nakane T., Takamatsu T. Operating an ideal heat integrated distillation column with different control algorithms // Computers and Chemical Engineering. 1998. V. 22. P. 389–393.
[https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(98\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(98)00079-9)
16. Nakaiwa M., Huang K., Endo A., Naito K., Owa M., Akiya T., Nakane T., Takamatsu T. Evaluating control structures for a general heat integrated distillation column (general HIDIc) // Computers and Chemical Engineering. 1999. V. 23. P. 851–854.
[https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(99\)80209-9](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(99)80209-9)
17. Nakaiwa M., Huang K., Naito K., Endo A., Owa M., Akiya T., Nakane T., Takamatsu T. A new configuration of ideal heat integrated distillation columns (HIDIc) // Computers and Chemical Engineering. 2000. 24(2–7), 239–245.
[https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00464-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00464-6)
18. Huang K.J., Shan L., Zhu Q.X., Qian J.X. A totally heat-integrated distillation column (THIDIc) – The effect of feed preheating by distillate // Applied Thermal Engineering. 2008. V. 28. № 8–9. P. 856–864.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.07.011>
19. Nova-Rincón A., Ramos M.A., Gómez J.M. Simultaneous optimal design and operation of a diabatic extractive distillation column based on exergy analysis // International Journal of Exergy. 2015. V. 17. № 3. P. 287–312.
<https://doi.org/10.1504/IJEX.2015.070500>
20. Anokhina E.A., Gracheva I.M., Akishin A.Yu., Timoshenko A.V. Acetone-chloroform-n-butanol mixture separation by the extractive distillation in schemes of two-outlet columns // Fine Chemical Technologies. 2017. V. 12. № 5. P. 34–46. (In Russ)
<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2017-12-5-34-46>
21. Aurangzeb Md., Jana A.K. Vapor recompression with interreboiler in a ternary dividing wall column: Improving energy efficiency and savings, and economic performance. App. Therm. Eng. 2018. V. 147. P. 1009–1023.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.008>