

$NTU = 7,4\%$ , для  $\Delta p = 15,3\%$ , что говорит о хорошем качественном и удовлетворительном количественном согласовании.

**Выводы.** В результате экспериментальных исследований получены обобщенные зависимости, позволяющие прогнозировать значения интегрального коэффициента теплоотдачи и аэродинамического сопротивления в компактных теплообменниках аппаратах, изготовленных на базе орошаемых пластин Френкеля для диапазона изменения геометрических параметров гофрирования (амплитуды  $5 \leq A \leq 9$  мм; шага  $9 \leq H \leq 21$  мм; угла скрещивания каналов  $30 \leq \varphi \leq 90^\circ$ ) и массовой скорости потока воздуха  $1.8 \leq v_p \leq 4.2$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Данные результаты могут быть использованы при определении оптимальных параметров насадок регулярной структуры на базе кософрированных пластин и для проектирования компактных теплообменников устройств (для косвенного испарительного охлаждения воздуха с целью энергосбережения, для тепловлажностной обработки воздуха в системах кондиционирования, для повышения эффективности работы установок различного назначения).

#### Литература

1. Крум Д., Робертс Б. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий.- М.: Стройиздат, 1980. – 399 с.
2. Бялый Б.И., Набиулин Ф.А. Интенсификация процессов теплообмена в каналах пластин Френкеля // Кондиционеростроение. – Харьков, 1976, вып. 5, С. 7–11.
3. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. – М.: Мир, 1972, – 381 с.
4. Современное отечественное и зарубежное оборудование для тепловлажностной обработки воздуха в центральных кондиционерах. Серия «Кондиционеры, калориферы и вентиляторы». Обзорная информация. – М.: ЦНИИТЭстромаш, 1978. – 58 с.

УДК 658.28:665.63:338

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕКОМПРЕССИИ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИНТЕГРАЦИИ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН

Быканов С.Н., канд. техн. наук, доцент, Перевертайленко А.Ю., ст.научн.сотр.,  
Гарев А.О., ассистент, Горбунов К.А., канд.техн.наук, доцент, Рябова И.Б. канд.техн.наук, доцент,  
Гапонова Е.А., канд. техн. наук, доцент, Кармазина Ю.А. студент  
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

*Рассмотрены вопросы применения механической рекомпрессии при комплексной тепловой интеграции ректификационных колонн и определены границы экономической целесообразности ее применения.*

*The problems of mechanical vapor compression for complex heat integration of distillation columns use and some related economic factors are discussed.*

**Ключевые слова:** ректификация, тепловая интеграция, утилиты, механическая рекомпрессия.

#### Постановка и актуальность задачи

Ректификационные колонны являются одним из наиболее энергоемких видов технологического оборудования. Как отмечено в [1–3], в большинстве ректификационных установок полностью отсутствует рекуперация тепла между горячими и холодными потоками, поэтому для нагрева сырья, поступающего на ректификацию, используются горячие утилиты (водяной пар), а для охлаждения дистиллята и кубового остатка используются холодные утилиты (охлаждающая вода). Тепловая интеграция потоков узла ректификации рассмотрена в ряде работ, например, в [4,5]. Отмечено, что при этом достигается существенная экономия утилит. Большая величина экономии тепловой энергии достигается при комплексной тепловой интеграции ректификационных колонн.

Основные принципы комплексной тепловой интеграции ректификационных колонн изложены в [3]. Для «внутренней» интеграции используется теплонасосная технология, предусматривающая механическую рекомпрессию паров низкокипящего компонента. Подобная технология отмечена как

перспективна в роботах [6,7] для определенного диапазона технологических параметров, например, для суммарной степени сжатия  $P/p < 2$ .

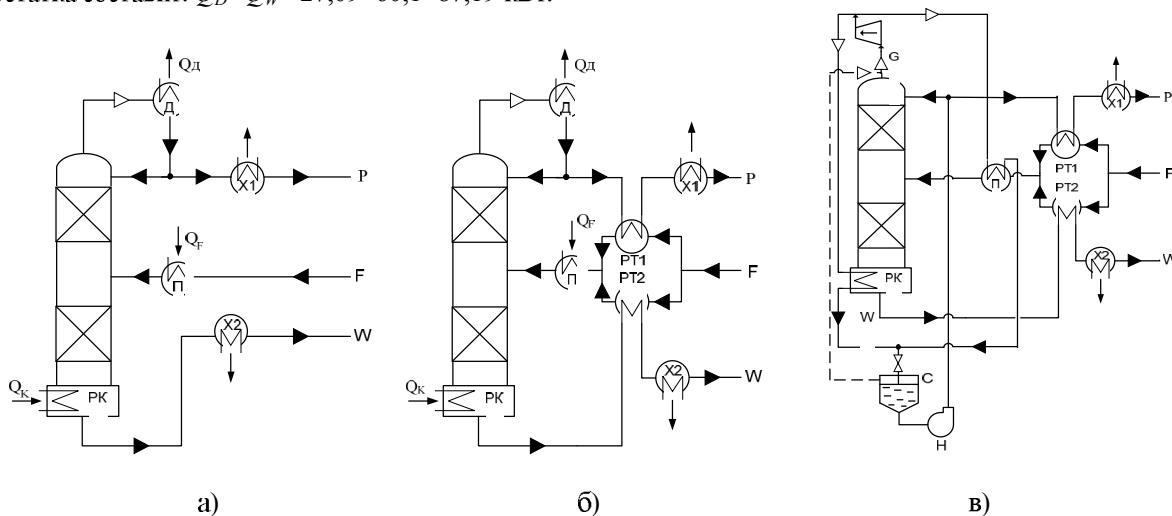
Целью данной работы является исследование экономической целесообразности использования механической рекомпрессии при комплексной тепловой интеграции ректификационных колонн для суммарной степени сжатия  $P/p > 2$ .

**Комплексная тепловая интеграция узла ректификации «метанол-этанол»**

Рассмотрим тепловую интеграцию установки ректификации на примере разделения смеси метанол-этанол. Содержание низкокипящего компонента (метанол, масс %): в исходной смеси  $\bar{x}_F = 42 \%$ , в дистилляте  $\bar{x}_D = 96 \%$ , в кубовом остатке  $\bar{x}_W = 4 \%$ . За основу взята принципиальная схема процесса ректификации, изображенная на рисунке 1а. Исходная смесь  $F$  подогревается до температуры кипения в подогревателе П и направляется в колонну. В кубе колонны происходит испарение смеси за счет тепла конденсации греющего пара. Пары, выходящие из колонны в количестве  $G$  конденсируются в дефлегматоре Д. Полученная жидкость делится на флегму  $\Phi$ , которая направляется в колонну, и дистиллят  $D$ , который охлаждается в холодильнике X1. Кубовый остаток  $W$ , собираемый из нижней части колонны, также охлаждается в холодильнике X2.

Подогреватель исходной смеси и испаритель куба обогреваются паром. В дефлегматоре Д, холодильниках дистиллята X1 и кубового остатка X2 охлаждающей средой является вода.

Рекуперация тепла в установке в данном случае отсутствует. Расчеты показывают, что расход греющего пара на проведение процесса составляет 0,79 кг/с (при абсолютном давлении греющего пара  $P_{zn} = 2$  атм.), из них 0,74 кг/с тратится на обогрев куба колонны и 0,05 кг/с - на подогрев исходной смеси до температуры кипения. Расход охлаждающей воды составляет 19,13 кг/с (при нагреве ее на 20 °С), из них 0,32 и 0,72 кг/с тратится на охлаждения дистиллята и кубового остатка и 18,09 кг/с затрачивается на конденсацию паров дистиллята в дефлегматоре. Количество тепла, которое необходимо затратить на подогрев исходной смеси, составит  $Q_F = 101,23$  кВт. Тепловая нагрузка куба колонны составляет  $Q_K = 1643,26$  кВт. Количество тепла, которое нужно отводить для охлаждения дистиллята и кубового остатка составит:  $Q_D + Q_W = 27,09 + 60,1 = 87,19$  кВт.



а – узел интеграции; б – «внешняя» интеграция; в – комплексная интеграция с применением теплового насоса

PK – ректификационная колонна; Д – дефлегматор; П – подогреватель; X – водяные холодильники; PT – рекуперативные теплообменники; G – компрессор; C – сепаратор; H – насос

**Рис. 1 – Комплексная интеграция узла ректификации**

Таким образом, общий расход утилит составляет:  $Q_K + Q_F = 1643,26 + 101,23 = 1744,49$  кВт (горячие утилиты), и  $Q_D + Q_D + Q_W = 1515,53 + 87,19 = 1602,72$  кВт (холодные утилиты). Здесь  $Q_D = 1515,53$  кВт – количество тепла, отдаваемое охлаждающей воде в дефлегматоре. Расчеты были проведены на основе материального и теплового баланса колонны.

Рассмотрим вариант модернизации технологической схемы ректификации с тепловой интеграцией основных технологических потоков на основе метода пинч-анализа и с применением механической рекомпрессии паров верха колонны. Пар, выходящий из верхней части ректификационной колонны, попадает в компрессор, где происходит его сжатие. При сжатии температура пара повышается, что

позволяет использовать его для обогрева куба колонны. Расход пара  $G$  определяется на основании материального баланса колонны и существенно зависит от флегмового числа, которое в нашем случае равно 3,62. Степень сжатия пара в компрессоре  $P_{эф}/P_K$  выбиралась с учетом разности температур пара дистиллята  $t_D$  и температуры кипения в кубе колонны  $t_W$ . В нашем случае степень сжатия пара  $P_{эф}/P_K=3$ , что позволяет повысить температуру паров до  $158^{\circ}\text{C}$ . Это достаточно, чтобы обеспечить устойчивую работу кубового испарителя.

Для проведения модернизации технологической схемы были рассчитаны расходы, теплоемкости и тепловые нагрузки основных технологических потоков. В качестве основных потоков были выбраны: горячие потоки: 1) дистиллят  $D$ ; 2) кубовый остаток  $W$ ; 3,4) пар выходящий из колонны  $G$ ; холодные потоки: 5) исходная смесь  $F$ ; 6) жидкость, находящаяся в кубе колонны. Их основные характеристики таковы: расход  $G$  (кг/с); начальная и конечная температура  $T_H, T_K$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); теплоемкость  $c$  (кДж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$ ). По формуле:

$$\Delta H(Q) = G \cdot c \cdot (T_H - T_K) = CP \cdot (T_H - T_K)$$

рассчитаны потоковые теплоемкости потоков  $CP$  (кВт/ $^{\circ}\text{C}$ ) и тепловые нагрузки потоков  $\Delta H(Q)$  (кВт). Эти данные приведены в таблице 1.

Строим большую составную кривую при  $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$ , затем методом табличного алгоритма находим, что при оптимальном размещении теплообменников можно рекуперировать  $Q_{рек} = 1717,61$  кВт тепла.

На основе полученных данных строим сеточную диаграмму и размещаем теплообменники. На рис. 1б приведена модернизированная схема установки с «внешней» интеграцией потоков, а на рис. 1в – с интеграцией теплового насоса с механической рекомпрессией паров низкокипящего компонента.

**Таблица 1 – Основные характеристики технологических потоков**

№	Наименование потока	$G$ , кг/с	$T_H$ , $^{\circ}\text{C}$	$T_K$ , $^{\circ}\text{C}$	$c$ , кДж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$	$CP$ , кВт/ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta H(Q)$ , кВт
1	$D$ (гор.)	0,298	65	30	2,598	0,774	27,09
2	$W$ (гор.)	0,424	78	30	2,954	1,252	60,01
3	$G$ (гор.)	1,431	158	94	1,983	2,838	181,63
4	$G$ (гор.)	1,431	94	94	–	–	1449,03
5	$F$ (хол.)	0,722	18	71	2,646	1,910	101,23
6	Куб (хол.)	–	78	78	–	–	1643,26

С помощью методик, приведенных в [4,7], определяем срок окупаемости интеграции узла ректификации смеси метанол-этанол. Для случая «внешней» интеграции эта величина составит 0,9 года, а для комплексной интеграции – 3,5 года.

#### Обсуждение результатов

Рассмотрим некоторые показатели, полученные при исследовании процессов тепловой интеграции, как «внешней», отак и комплексной и приведенные в работах [1–3], а также в данной работе. В качестве таких показателей возьмем следующие величины: экономия горячих утилит  $\mathcal{E}_Г, \%$ ; экономия холодных утилит  $\mathcal{E}_Х, \%$ ; степень сжатия  $P/p$ ; коэффициент преобразования теплового насоса  $COP$  и срок окупаемости энергосберегающего мероприятия  $T_{OK}$ , лет. Величины этих показателей для различных рассмотренных вариантов интеграции приведены в таблице 2.

Данные, приведенные в таблице 2, согласуются с данными, приведенными в работах [6,7].

«Внешняя» тепловая интеграция потоков ректификационной колонны обеспечивает достаточно высокий уровень экономии утилит при малых сроках окупаемости (менее 1 года). При соотношении цен на природный газ и электроэнергию, существующим в настоящее время в Украине, нецелесообразно применять механическую рекомпрессию паров низкокипящего компонента при комплексной тепловой интеграции установок ректификации при степени сжатия паров  $P/p > 3$ . В этом случае целесообразно применить «внешнюю» интеграцию, либо рассмотреть применение теплонасосных технологий с замкнутым контуром по рабочему телу, например, компрессионно-абсорбционный цикл, как это рекомендуется в [6].

**Выводы**

Рассмотрена комплексная тепловая интеграция процесс ректификации смеси метанол-вода и проведено сравнение технико-экономических показателей с другими вариантами тепловой интеграции ректификации других смесей. Установлена верхняя граница целесообразности применения механической рекомпрессии паров низкокипящего компонента для комплексной тепловой интеграции потоков ректификационной колонны с применением теплонасосных технологий.

**Таблица 2 – Технико-экономические показатели тепловой интеграции для различных процессов ректификации**

№	Процесс ректификации и вариант его тепловой интеграции	$\Xi_T$	$\Xi_X$	P/p	COP	$T_{OK}$
1.	Вода-уксусная кислота; комплексная интеграция [1]	до 100 %	99,3	2,0	5,97	2
2.	Метанол-этанол; «внешняя» интеграция [2]	80	73	–	–	0,3 [2]
3.	Этанол-вода; комплексная интеграция [3]	95	96	2,9	5,43	2,5
4.	Метанол-этанол; данная работа; комплексная интеграция	98	до 100	3,0	3,24	3,5

**Литература**

1. Гарев А.О., Чернышев И.С., Бабак Т.Г., Колесник С.А. Способы экономии энергоносителей в ректификационных установках – «Інтегровані технології та енергозбереження»– Харків.– 2009.– №4, С. 70–74.
2. Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Рябова И.Б., Ковальчук А.А. Определение энергосберегающего потенциала для процесса ректификации смеси этанол-метанол.– Вісник НТУ «ХПІ», тематичний випуск «Іноваційні дослідження у наукових роботах студентів», Збірник наукових праць, вип. №32, 2010, С. 84–93.
3. Быканов С.Н., Перевертайленко А.Ю., Гареев А.О. и др. К вопросу комплексной тепловой интеграции процесса ректификации смеси этанол-вода. – Наукові праці ОНАХТ, Одеса, 2012, випуск 41, т.2, С. 170–173.
4. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых Процессов.– Харьков НТУ«ХПИ», 2000, 456 с.
5. Dhole V.R., Linnhoff B. Distillation Columns Targets.– Proceedings of ESCAPE-7 Symposium, Elsinore, Denmark, May 24–28, 1992.
6. Kiss A.A., Flores Landaeta S.T., Infante Ferreira C.A. Mastering Heat Pumps Selection for Energy Efficient Distillation – “Chemical Engineering Transactions”, 2012, vol.29, p.397–402.
7. Use Vapor Recompression to Recover Low-Pressure Waste Steam.– US DoE, Advanced Manufacturing Office, Steam Tip Sheet #11, January 2012, 2 pp.