

ристанням напівпроникних мембран є значення тиску 0,4...0,5 МПа, температури 40...50 °С, тривалість процесу УФ – 1...1,5 годин.

#### Література

1. Сокол Н.В., Хатко З.Н., Донченко Л. В., Фирсов Г.Г. Состояние рынка пектина в России и за рубежом // Новые технологии. 2008. № 6 – С. 30 – 35.
2. Парахонский А.П. Эндоэкология и проблема пектина // Успехи естествознания, № 3 2009. – С. 44 – 45.
3. Гузенко В.В., Лихобаба О.В. Методи концентрування пектинових екстрактів // Актуальні проблеми розвитку харчових виробництв, ресторанного та готельного господарств і торгівлі: тези всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів. – Харків: ХДУХТ, 2012. – Ч. 2. – С. 60.
4. Дейниченко Г.В., Мазняк З.О. Використання мембранних методів під час виробництва пектинових концентратів / Г. В. Дейниченко, З. О. Мазняк // Науковий вісник Полтавського університету споживчої кооперації України. – 2004. – №2. – С.43 – 44.
5. Кузнецова Е.А., Ультрафильтрационное концентрирование и очистка экстрактов подсолнечного пектина / Е.А. Кузнецова, А.В. Халецкий, А.Л. Лукин, В.В. Котов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. – Т.7. – Вып.6 – С. 965 – 967.
6. Голубев, В. Н. Пектин : химия, технология, применение / В. Н. Голубев, Н. П. Шелухина. – Москва, 1995. – 387с.
7. Дейниченко, Г. В. Ультрафільтраційні процеси та технології раціональної переробки білково-вуглеводної молочної сировини / Г. В. Дейниченко, З. О. Мазняк, І. В. Золотухина. – Х : Факт, 2008. – 208 с.

УДК 658.28:665.63:338.44

## К ВОПРОСУ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕПЛОВОЙ ИНТЕГРАЦИИ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ СМЕСИ ЭТАНОЛ–ВОДА

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

*Рассмотрена проблема теплоинтегрированной ректификационной колонны, включая применение теплонасосной технологии и методики пинч-анализа. Отмечена важность комплексной тепловой интеграции колонны.*

*The problem of heat integrated rectification column is considered, including heat pump technology. The high significance of complex heat integration of the column is underlined.*

**Ключевые слова:** ректификация, интеграция, пинч-анализ, утилити, составные кривые.

**Постановка и актуальность задачи.** Процессы ректификации являются одними из наиболее энергоемких процессов химической технологии. Особенно велики затраты тепловой энергии при ректификации смесей, состоящих из компонентов, температуры кипения которых близки.

С целью снижения энергоемкости процессов ректификации был проведен и проводится в настоящее время ряд научных исследований, связанных с тепловой интеграцией ректификационных колонн [1–4]. В ряде работ, например [3,4], введено такое определение, как «теплоинтегрированная ректификационная колонна».

Анализ информации, которая содержится в упомянутых выше источниках, позволяет сформировать подход к решению задачи создания теплоинтегрированной ректификационной колонны. Суть его сводится к решению в два этапа: «внутренняя» интеграция колонны и «внешняя» интеграция колонны.

Для «внутренней» интеграции используется теплонасосная технология, предусматривающая механическую компрессию паров низкокипящего компонента. Сжатый пар используется в кипятильнике колонны в качестве теплоносителя наряду с греющим паром, в результате чего

снижается расход последнего. Принципы построения схем ректификации с использованием тепловых насосов описаны в [3–5].

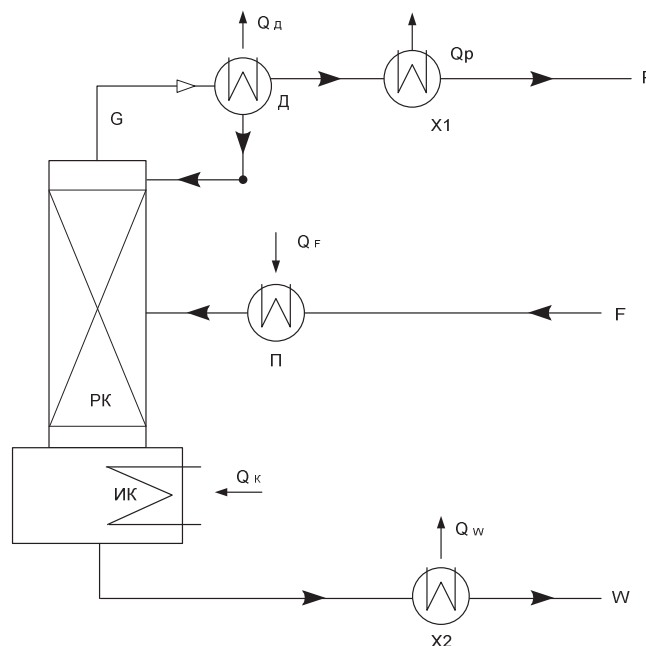
«Внешняя» интеграция колонны представляет собой тепловую интеграцию потоков дистиллята, кубового остатка и исходной смеси с учетом «внутренней» интеграции ректификационной колонны. В данном случае используется метод пинч-анализа [2].

**Описание технологической схемы установки.** Рассмотрим тепловую интеграцию процесса ректификации на примере разделения смеси этанол–вода производительностью 11250 кг/ч. Содержание низкокипящего компонента: в исходной смеси  $\bar{x}_F = 10\%$ , в дистилляте  $\bar{x}_P = 88\%$ , в кубовом остатке  $\bar{x}_W = 1,5\%$ . Разность температур кипения компонентов смеси составляет  $22^\circ\text{C}$ . Принципиальная схема традиционного способа ректификации представлена на рис. 1.

Исходная смесь  $F$  подогревается до температуры кипения в подогревателе  $\Pi$  и направляется в колонну. В кубе колонны происходит кипение смеси за счет тепла, подводимого в кипятильник ИК греющим паром. Дистиллят отводится из верхней части колонны, конденсируясь и охлаждаясь, кубовый остаток отводится из нижней части колонны, охлаждаясь в водяном холодильнике  $X2$ . В дефлегматор  $D$  и холодильник дистиллята  $X1$  также подается охлаждающая вода. В качестве греющего пара используется насыщенный водяной пар ( $P_{абс} = 4$  ата), потребление которого на проведение процесса составляет 0,93 кг/с; расход охлаждающей воды составляет 23,32 кг/с. Из материального и теплового балансов колонны получаем значения количества тепла, которое необходимо подвести и отвести:

- подогрев исходной смеси  $Q_F = 793,17$  кВт;
- тепло, подводимое в куб колонны  $Q_K = 1195,85$  кВт;
- тепло, отводимое от дистиллята и кубового остатка в холодильниках  $X1$  и  $X2$ ,  $Q_{X1} + Q_{X2} = 50,27 + 800,22 = 850,49$  кВт.

Тепловые потери принимаем менее 5 %.



$РК$  – ректификационная колонна,  $D$  – дефлегматор,  $\Pi$  – подогреватель,  
 $ИК$  – испаритель куба,  $X1$ ,  $X2$  – холодильники

**Рис. 1 – Принципиальная схема процесса ректификации**

Нетрудно заметить, что рекуперация тепла в схеме, представленной на рис. 1, отсутствует. Для снижения потребления греющего пара ректификационной колонны рассмотрим применение компрессии паров верха колонны и их подачу в дополнительный кипятильник ДИ, расположенный в нижней части колонны. Общую степень сжатия паров выбираем с таким расчетом, чтобы обеспечить в дополнительном кипятильнике ДИ кипение смеси. Таковой режим обеспечивается при конденсации насыщенных паров

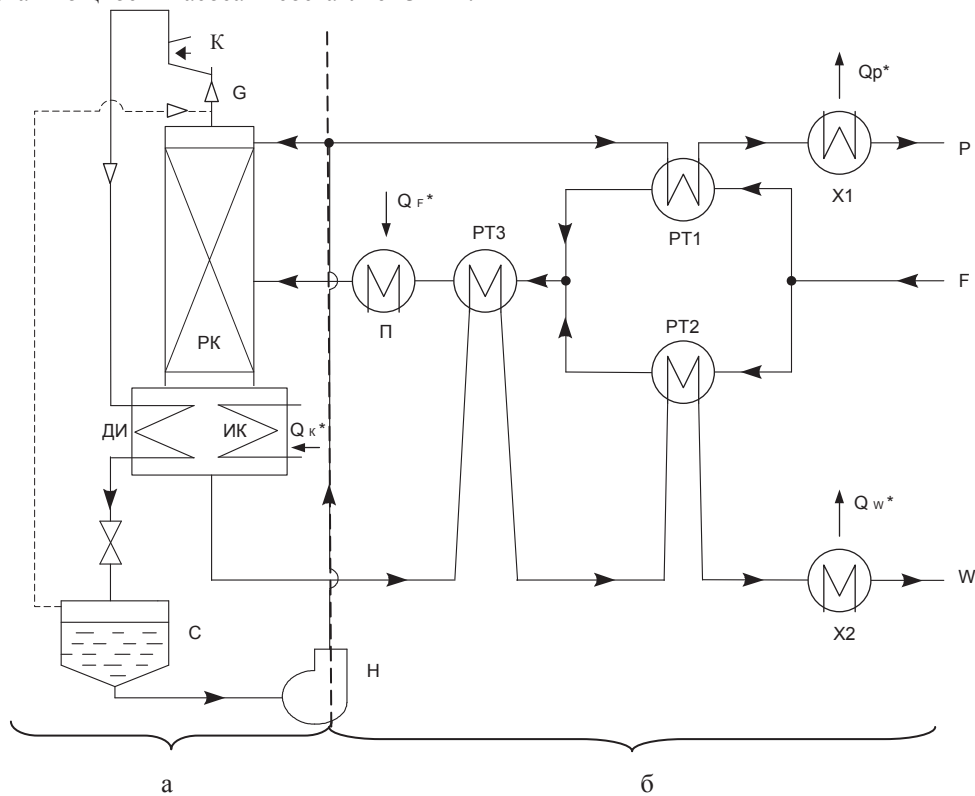
верха колонны при температуре  $t_{ди} = 107^\circ\text{C}$ . При сжатии паров имеет место перегрев этих паров до температуры  $t'_{ди} = 126^\circ\text{C}$ . Тогда тепловая производительность дополнительного кипятильника ДИ равна:

$$Q_{ди} = G \cdot (r + C \cdot (t'_{ди} - t_{ди})), \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход паров на компримирование, кг/с (см. рис. 2);  $r$  – удельная теплота конденсации паров, кДж/кг;  $C$  – удельная теплоемкость паров, кДж/(кг  $^\circ\text{C}$ ).

В численном выражении величина  $Q_{ди} = 1097,69$  кВт. На эту величину сокращается потребление пара ректификационной колонной, что составляет 56 % от общего потребления. Эта величина находится в хорошем соответствии с данными, приведенными в работах [3,4]. Для сжатия паров необходимо компрессорное оборудование, суммарная потребляемая электрическая мощность которого составляет 200 кВт.

Ректификационная колонна с термокомпрессором представлена на рис. 2а. Пары  $G$  верха колонны сжимаются в паровом компрессоре (К) и подаются в дополнительный кипятильник ДИ, где охлаждаются и конденсируются, обеспечивая процесс кипения смеси в ДИ. Сконденсировавшаяся жидкость – практически чистый этиловый спирт – проходит через дроссель, направляется в сепаратор  $C$ , а из сепаратора насосом  $H$  откачивается в делитель, где делится на дистиллят и флегму. При этом нет необходимости в функционировании дефлегматора, поэтому эта позиция исключается. Это позволяет сэкономить охлаждающую воду, отводившую от дефлегматора 1103,71 кВт тепла. Потребляемая электрическая мощность насоса  $H$  составляет 3 кВт.



$РК$  – ректификационная колонна,  $КОМП$  – компрессор,  $П$  – подогреватель,  
 $ИК$  – испаритель куба,  $ДИ$  – дополнительный испаритель куба,  $Х1,2$  – холодильники,  
 $РТ1, РТ2, РТ3$  – рекуперативные теплообменники,  $С$  – сепаратор,  $Н$  – насос;  
 1 – «внутренняя» интеграция; 2 – «внешняя» интеграция

**Рис. 2 – Схема процесса ректификации с тепловой интеграцией основных технологических потоков и термокомпрессором**

Для оценки эффективности «внутренней» интеграции, а также для «внешней» интеграции ректификационной колонны воспользуемся методами пинч-анализа [2]. Построенные большие составные кривые показывают, что тепловой насос переносит тепло через пинч (источник – сток), следовательно, его применение целесообразно.

Построение сеточной диаграммы, размещение рекуперативных теплообменников и применение метода табличного алгоритма позволяют определить величину рекуперативного тепла, которая составляет  $Q_{рек} = 1871,38$  кВт. Конфигурация оптимального размещения теплообменников, рекуператоров тепло дистиллята и кубового остатка для нагрева исходной смеси, представлена на рис. 2б.

«Внешняя» интеграция ректификационной колонны дает возможность сэкономить 773,7 кВт тепла, подводимого к процессу (39 %) и примерно такую же величину по холодным утилитам.

Таким образом, комплексная «внутренняя» и «внешняя» интеграция ректификационной колонны позволяет снизить расход подводимой тепловой энергии (греющего пара) на 95 % по сравнению с базовым вариантом (рис. 1), а расход охлаждающей воды – почти на 96 %.

#### Выводы

Проведем общую оценку ориентировочной экономической эффективности по рекомендациям, приведенным в [6,7]. В денежном выражении экономическая эффективность составит около 1,6 млн. грн. в год, а срок окупаемости – 2,5 года, что объясняется высокой стоимостью компрессорного оборудования. Следовательно, основной задачей дальнейших исследований является поиск оптимальной разности температур, реализуемой при сжатии паров верха колонны.

Комплексная интеграция ректификационной колонны может сделать применение термокомпрессии с суммарной степенью сжатия  $P/p > 2$  экономически целесообразной.

#### Литература

1. Dhole V.R., Linnhoff B. Distillation Column Targets.– Proceedings of ESCAPE–7 Symposium, Elsinore, Denmark, May, 24–28, 1992.
2. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульев Л.М. Основы интеграции тепловых процессов.– Харьков, НТУ «ХПИ», 2000.– 456 с.
3. Nakaiwa M., Ohmori T. Innovation in distillation processes.– “Synthesiology.” English edition, 2009, v.2, No. 1, p. 55–63.
4. Gadalla M. et al. A design method for internal heat integrated distillation columns (iHJDiCs).– Proceedings of ESCAPE–17 Symposium, Elsevier, 2007, 6 pp.
5. Стабников В.Н. Перегонка и ректификация этилового спирта.– М. Пищевая промышленность, 1969б 465 с.
6. Vapor Recompression. Electric Ideas Clearinghouse.– July, 1992, 4 pp.
7. Use Vapor Recompression to Recover Low-Pressure Waste Steam.– US DoE, Advanced Manufacturing Office, Steam Tip Sheet #11, January, 2012, 2 pp.

УДК 66.045.01

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ПЛАСТИНЧАТОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ САХАРНОГО СОКА С УЧЕТОМ ОТЛОЖЕНИЙ

<sup>1</sup> Арсеньева О.П., канд. техн. наук, доцент <sup>1</sup> Бабак Т.Г.,

<sup>2</sup> Капустенко П.А., канд. техн. наук, профессор <sup>2</sup> Хавин Г.Л., канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup> Национальный технический университет «ХПИ»

<sup>2</sup> АО «Содружество-Т», г. Харьков

*Рассмотрена задача практической модернизации системы подогревателей сахарного сока перед выпариванием. Исследуется влияние загрязнений теплообменной поверхности на работоспособность аппарата. Показано, что объяснение увеличения потерь давления за счет уменьшения эквивалентного диаметра является не корректным, так как имеет место и должно учитываться изменение характеристик гидравлического трения. Проектирование теплообменника с запасом поверхности может привести к интенсификации отложений за счет уменьшения скорости в каналах.*