

УДК 66.066

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ВЫДЕЛЕНИЯ ФЕНОЛА

Башаров М.М.

*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань
e-mail: tvf_kgeu@mail.ru*

Аннотация. Энергосбережение в нефтехимии и других отраслях промышленности становится все более актуальным направлением. В последнее десятилетие многие промышленные предприятия выполняют модернизацию или замену оборудования для повышения качества продукции и снижения энергозатрат. На ОАО «Казаньоргсинтез» поставлена задача увеличения производительности ректификационных установок получения фенола и ацетона с повышением качества разделения. В данной статье рассмотрены математические модели для расчета промышленных тарельчатых и насадочных колонн. Для выбора высокоэффективных контактных устройств использованы энергетический коэффициент, фактор интенсивности массообменного процесса и термодинамический анализ различных вариантов модернизации ректификационной колонны выделения фенола. Показано преимущество в использовании регулярной рулонной насадки.

Ключевые слова: *регулярная рулонная насадка, провальная тарелка, ректификационная колонна, фенол, энергетический анализ, модернизация*

Введение

Одним из самых энергоемких и широко используемых процессов на предприятиях ТЭК-нефтехимия является процесс ректификации смесей. Массообменные колонны имеют сложную конструкцию, большую металлоемкость и повышенный расход энергии в виде греющих и охлаждающих агентов. Расход энергии в значительной мере зависит от совершенства аппаратного оформления, т.е. эффективности используемых контактных устройств в колоннах. Из теории и практики ректификации известно, что чем ниже эффективность контактных устройств, тем требуется больший расход флегмы (флегмовое число) и, следовательно, повышается расход греющего агента в кипятильнике колонны и охлаждающего в дефлегматоре. Известны примеры модернизации ректификационных колонн, обеспечивающие снижение расхода теплоносителей в два раза, даже при работе с повышенной нагрузкой на 30 % от проектной. Модернизация заключается в оптимизации режимов и размеров колонн и использовании высокоэффективных контактных устройств взамен устаревших. Данное направление имеет большие перспективы, так как часто позволяет с небольшими капитальными затратами и сроками исполнения добиться значительного снижения энергозатрат на единицу продукции.

В статье используется подход С.Г. Дьяконова, В.И. Елизарова и А.Г. Лаптева [1 - 4] к математическому моделированию тепло-массообменных процессов и

А.Г. Лаптева, М.И. Фарахова [5] к энергосберегающей модернизации промышленных аппаратов и установок на предприятиях нефтегазохимического комплекса и энергетики.

Постановка задачи

На ОАО «Казаньоргсинтез» поставлена задача увеличения производительности ректификационных установок получения фенола и ацетона с повышением качества разделения. Действующие в настоящее время ректификационные установки проектировались в конце 50-х годов и вводились в эксплуатацию в 1963 году. Это были первые установки на ОАО «Казаньоргсинтез» [6].

Ректификационная колонна получения фенола исчерпала ресурс эксплуатации, поэтому рассмотрена задача проектирования новой колонны с использованием современных контактных устройств. Действующая до модернизации ректификационная колонна К-48 диаметром 2400 мм предназначена для получения товарного фенола. Колонна К-48 тарельчатая, имеет 66 решетчатых тарелок. Колонна работает под остаточным давлением вверху не более 150 мм рт. ст. и температуре в кубе колонны до 140 °С. Исходная смесь при температуре 130-140 °С поступает в колонну и содержит фенол, ацетофенон, изопропилбензол, окись мезитила и другие легкие и тяжелые примеси. Сконденсированная в конденсаторе паровая фаза верха колонны К-48 стекает в сборник. Часть жидкости из сборника возвращается в колонну в виде флегмы, а избыток по уровню во флегмовой емкости отбирается в качестве верхнего продукта головного погона. Колонна имеет боковой отбор фенола в верхней части.

Математические модели массопереноса в тарельчатых и насадочных колоннах

Разработка научно-технических решений по модернизации массообменных аппаратов невозможна без привлечения математических моделей процессов разделения смесей. Ниже рассмотрены математические модели, которые использовались для расчета различных вариантов модернизации колонны К-48.

Математическая модель барботажного слоя. На барботажных тарелках наиболее часто используемым допущением является допущение о полном перемешивании жидкой фазы по высоте слоя, что хорошо подтверждается экспериментально. Особенно это справедливо для пенного слоя на провальных тарелках (т.е. без специальных переливных устройств), которые использовались в колонне К-48 до модернизации. Это значительно упрощает математическую модель тепло- и массопереноса, используемую в практических целях для расчета эффективности контактных устройств и всей массообменной колонны.

В каждой секции (т.е. на тарелке) согласно модели происходит полное перемешивание жидкости, а паровой поток движется в режиме идеального вытеснения. Между секциями перемешивание отсутствует.

Для секционной модели колонны уравнение массопереноса имеет вид:

$$U_{ж(i)} \frac{(C_{ж(i-1)} - C_{ж(i)})}{\Delta l_i} = (a_v k_c)_i (C_{ж(i)} - C_{ж(i)}^*), i=1,2,3, \dots, n, \quad (1)$$

где $C_{ж}$ (с соответствующим индексом) – концентрация компонента в жидкой фазе; $C_{ж(i)}^*$ – равновесная концентрация жидкости к концентрации пара в секции, Δl_i – размер секции в вертикальном направлении, м; n – число секций; $U_{ж(i)}$ – средняя скорость жидкости в секции, м/с; k_c – коэффициент массопередачи, м/с; a_v – удельная поверхность контакта фаз, м²/м³. Уравнение (1) решается совместно с уравнением материального баланса:

$$G(C_{г(i)} - C_{г(i+1)}) = L(C_{ж(i-1)} - C_{ж(i)}), \quad (2)$$

где L , G – массовые расходы, кг/с.

Пренебрегая в первом приближении возможной нелинейностью рабочих линий на тарелке, примем в качестве средней концентрации среднее арифметическое: $C_{г(ср)} = G(C_{г(i+1)} + C_{г(i)})/2$.

Из уравнений (1)-(2), учитывая, что $C_{ж(i)}^* = C_{г(ср(i))}/\bar{m}$, записана концентрация целевого компонента в жидкой фазе, в i -ой ячейки:

$$C_{ж(i)} = \frac{C_{ж(i-1)} + b C_{г(i+1)} + \frac{b L}{2 G} C_{ж(i-1)}}{b \bar{m} + 1 + \frac{b L}{2 G}}, i=1,2,3 \dots n, \quad (3)$$

где $b = \frac{(a_v k_c)_i \Delta l_i}{U_{ж(i)} \bar{m}}$; \bar{m} – коэффициент распределения (равновесия).

Коэффициенты массопередачи на провальных тарелках вычисляются с использованием теоретических уравнений, полученных в работах [1, 3, 4].

Математическая модель насадочной колонны. Для повышения эффективности процесса ректификации в колонне К-48 возможен вариант замены тарелок на насадку. Для расчетов массообменных насадочных колонн использовалась диффузионная модель структуры потока.

Уравнения известной однопараметрической диффузионной модели для жидкой и газовой фаз при стационарном режиме работы колонны имеют вид:

$$\begin{aligned} W_{ж} &= \frac{dX}{d\xi} = D_{пж} \frac{d^2 X}{d\xi^2} + r_x; \\ W_{г} &= \frac{dY}{d\xi} = D_{пг} \frac{d^2 Y}{d\xi^2} - r_y, \end{aligned} \quad (4)$$

где $D_{пж}$, $D_{пг}$ – коэффициенты продольного перемешивания в жидкой и газовой фазах, м²/с; r_y , r_x – источники массы в фазах; ξ – вертикальная координата;

X, Y – концентрация компонента в жидкой и газовой фазах; $W_{ж}, W_{г}$ – скорости жидкости и газа, м/с.

Источники массы r_y, r_x определяют количество массы перераспределяемого компонента, переходящее из одной фазы в другую в единицу объема насадочного слоя, и связаны с объемным коэффициентом массопередачи и движущей силой процесса [1].

Граничные условия к уравнениям (4) записываются в виде условий Данквертса.

Система дифференциальных уравнений (4) решается численными методами. Решение дает распределение поля концентраций в жидкой и газовой фазах по высоте колонны и дает возможность рассчитать высоту слоя насадки в массообменном аппарате с учетом перемешивания потоков [4, 5].

Массообменные и энергетические характеристики аппаратов

Рассмотрены следующие массообменные нерегулярные и регулярные контактные устройства: насадка «Инжехим-2000», стальные кольца Рашига 50×50, стальные кольца Палля 50×50, кольца Sulzer C-Ring No.2.5, регулярная насадка Mellapak фирмы «Sulzer Chemtech» 125Y, регулярная рулонная насадка «Инжехим» [5, 7, 8].

Для совместной оценки гидродинамических и массообменных характеристик тарелок и насадок использованы известные энергетические комплексы:

$$\text{в общем виде } E'_{\max} = \frac{M}{N}, \text{ или для насадки: } E_{\min} = \frac{\Delta p_{\text{оп}} \cdot h_{\text{ор}}}{H}, \quad (5)$$

где M – количество массы компонента переходящего из одной фазы в другую, кг/с; N – мощность на подачу фазы, Вт; $\Delta p_{\text{оп}}$ – перепад давления в колонне, Па; H – высота слоя насадки, м; $h_{\text{ор}}$ – высота единиц переноса, м.

Выражения для (5) E'_{\max} можно также использовать и для оценки энергетической эффективности тарельчатых колонн. Комплекс E_{\min} характеризует энергозатраты и массообменную эффективность насадочных контактных устройств.

Чем меньше гидравлическое сопротивление и больше коэффициент массопередачи (т.е. ниже значение $h_{\text{ор}}$), тем меньше комплекс E и, следовательно, эффективнее насадка.

Для оценки интенсивности массообменных аппаратов использован фактор

$$i = \frac{M}{V} = \frac{K_c F \overline{\Delta C}}{V}, \quad (6)$$

где V – рабочий объем аппарата, м³; K_c – коэффициент массопередачи, м/с; $\overline{\Delta C}$ – средняя движущая сила массопередачи; F – поверхность массопередачи, м².

Установлено, что для нерегулярных насадок комплекс E_{\min} (5), фактор i (6) принимают экстремальные значения с контактными устройствами «Инжехим-2000» и с их аналогами [5].

Для регулярных насадок экстремальные значения E_{\min} и i обеспечивает регулярная рулонная насадка «Инжехим» с шероховатой поверхностью [5].

Для наиболее энергоемких процессов (например, ректификация) далее используется термодинамический анализ теплотехнологической схемы с вычислением теплового и эксергетического коэффициентов полезного действия (использования теплоты).

Варианты модернизации ректификационной колонны

Ниже рассмотрены различные варианты модернизации колонны К-48 для выбора наиболее эффективного с массообменной и энергетической точки и который удовлетворяет по качеству получения фенола. Как известно, термодинамический анализ широко применяется для оценки эксергетической эффективности технологических процессов. К настоящему времени разработана методика термодинамического анализа и в, частности, наиболее современного его варианта – эксергетического анализа [9].

Для анализа термодинамической эффективности энергетических систем и теплотехнологии промышленных производств, существенное значение имеет тепловой компонент эксергетического вектора и расходные характеристики.

Методика составления эксергетического баланса и его последующего анализа базируется на исследованиях, проведенных различными авторами. Порядок проведения эксергетического анализа теплоэнергетической эффективности теплотехнологических процессов нефтехимической промышленности включает в себя ряд этапов [9].

В табл. 1 представлены эксергетический и тепловой КПД колонны К-48 с основным оборудованием до модернизации.

С целью наглядного изображения энергетических и эксергетических балансов установки составляются диаграммы потоков энергии и эксергии (рис. 1). На этих диаграммах отдельные элементы установки соединяются изображениями потоков, ширина полос которых соответствует значениями энергии и эксергии.

Требования качеству:

- содержание ацетофенона в товарном феноле не выше 10 ppm.
- содержание фенола в кубовом продукте не выше 90 % масс. Производительность по исходной смеси до реконструкции 8-10 т/ч, после – 12 т/ч.

Таблица 1. Степень энергетических и термодинамических показателей элементов оборудования с колонной К-48 до модернизации

Элементы оборудования	η_{τ}	η_{ϵ}
Колонна 48 до реконструкции		
Колонна	0,97	0,23
Емкость Е-56	1,0	1,0
Дефлегматор Д-50	0,97	0,16
Конденсатор К-52	0,97	0,19
Холодильник Х-72	0,97	0,18
Кипятильник К- 49	0,97	0,17
Емкость Е-54	1,0	1,0

η_{τ} – тепловой КПД, η_{ϵ} – эксергетический КПД

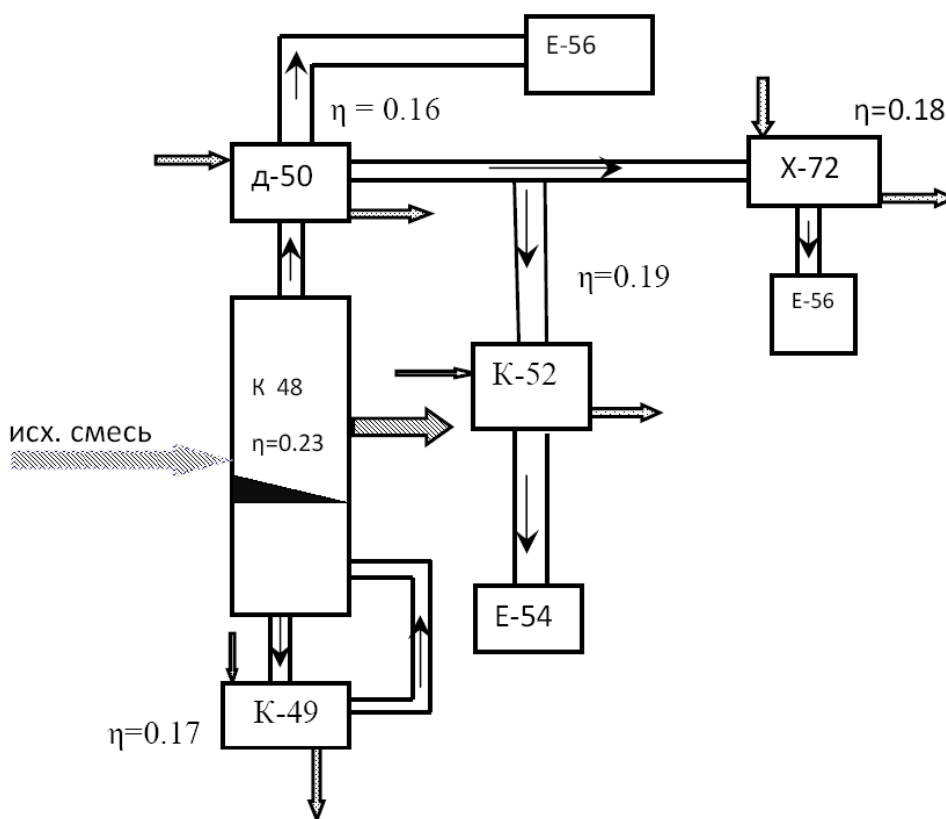


Рис. 1. Эксергетическая потоковая диаграмма К-48 до модернизации

Результаты расчета тарельчатого варианта колонны К-48 для получения товарного фенола

Производительность новой колонны по исходной смеси 12 т/ч. В качестве варианта замены К-48 рассмотрен тарельчатый вариант новой колонны с решетчатыми безпереливными тарелками.

Диаметр колонны	2400 мм
Число тарелок	62 шт

По результатам технологического расчета рассмотрен режим работы колонны К-48, позволяющий получить требуемое качество продуктов разделения, и выполнен термодинамический анализ.

Результаты термодинамического анализа представлены в табл. 2.

Проведено моделирование гидродинамических режимов работы колонны К-48 с решетчатыми безпереливными тарелками. Скорость пара в колонне не превышает 7,5 м/с, а фактор пара изменяется в пределах 1,5÷2,97 при нагрузке по питанию 12000 кг/ч. Перепад давления в колонне К-48 с 62 тарелками не превышает 147 мм рт. ст.

Таблица 2. Степень энергетических и термодинамических совершенств элементов оборудования

Элементы оборудования	η_r	η_e
Колонна с тарелками		
Колонна	0,97	0,26
Емкость Е-56	1,0	1,0
Дефлегматор Д-50	0,98	0,20
Конденсатор К-52	0,97	0,19
Холодильник Х-72	0,97	0,16
Кипятильник К-49	0,97	0,22
Емкость Е-54	1,0	1,0

Результаты расчета насадочного-тарельчатого варианта колонны К-48 для получения товарного фенола

В связи с тем, что максимальная нагрузка по пару для контактных устройств К-48 наблюдается выше ввода питания рассмотрен вариант модернизации К-48, в котором выше ввода питания размещена насадка, а ниже ввода питания установлены решетчатые безпереливные тарелки.

Высота слоя насадки	8 м
Число тарелок	16 шт
Диаметр колонны	2200 мм

По результатам технологического расчета рассмотрен режим работы колонны К-48, позволяющий получить требуемое качество продуктов разделения, и выполнен термодинамический анализ.

Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Степень энергетических и термодинамических совершенств элементов оборудования

Элементы оборудования	η_t	η_e
Колонна тарельчато-насадочная		
Колонна	0,98	0,27
Емкость Е-56	1,0	1,0
Дефлегматор Д-50	0,98	0,15
Конденсатор К-52	0,98	0,19
Холодильник Х-72	0,97	0,16
Кипятильник К- 49	0,98	0,20
Емкость Е-54	1,0	1,0

Проведено моделирование гидродинамических режимов работы насадочного-тарельчатого варианта колонны К-48. Скорость пара в колонне не превышает 6,7 м/с, а фактор пара изменяется в пределах 1,56÷3 при нагрузке по питанию 12000 кг/ч. Перепад давления в колонне К-48 со слоем насадки высотой 18 м и 16 тарелками не превышает 95.44 мм рт. ст.

Результаты расчета насадочного варианта колонны К-48 для получения товарного фенола

В качестве варианта замены К-48 рассмотрен насадочный вариант новой колонны. В качестве насадки выбрана регулярная рулонная насадка «Инжехим», которая обеспечивает высокие массообменные и энергетические характеристики [5, 8, 10]. Вид насадки дан на рис. 2 [5].

Диаметр колонны	2200 мм
Высота цилиндрической части колонны	5900 мм
Слоев насадок	5
Общая высота насадки	26,5 м
Объем насадки	100,68 м ³
Удельная поверхность насадки	240 м ² /м ³
Удельный свободный объем	0,9

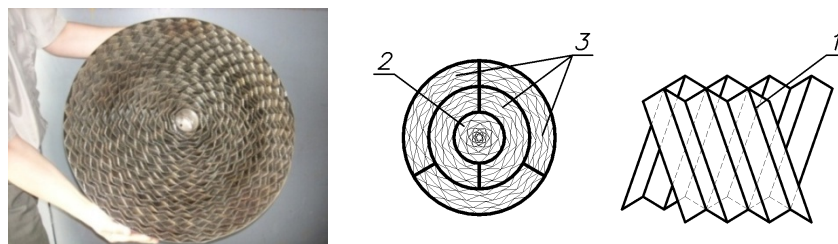


Рис. 2. Регулярная рулонная насадка «Инжехим»:

1 – гофры смежных листов, 2 – центральный пакет, 3 – остальные пакеты

По результатам технологического расчета рассмотрен режим работы колонны К-48, позволяющий получить требуемое качество продуктов разделения и выполнен термодинамический анализ.

Результаты представлены в табл. 4.

Проведено моделирование гидродинамических режимов работы слоя насадки колонны К-48. Скорость пара в колонне не превышает 5,8 м/с, а фактор пара изменяется в пределах 2,07÷2,86 при нагрузке по питанию 12000 кг/ч. Перепад давления слоя насадки общей высотой 26,5 м не превышает 53 мм рт. ст.

Табл. 4. Степень энергетических и термодинамических совершенств элементов оборудования

Элементы оборудования	η_t	η_e
Колонна с насадками		
Колонна	0,99	0,28
Емкость Е-56	1,0	1,0
Дефлегматор Д-50	0,97	0,19
Конденсатор К-52	0,97	0,19
Холодильник Х-72	0,98	0,18
Кипятильник К- 49	0,97	0,22
Емкость Е-54	1,0	1,0

Таблица 5. Сравнительные характеристики вариантов модернизации ректификационной колонны К-48

№	Вид модернизации	D_k , м	n	H , м	R	η_t	η_e	E	Q	i
1	Тарельчатый	2,4	62	-	1,63	0,97	0,26	$2,32 \cdot 10^{-2}$	2,63	106,2
2	Насадочно-тарельчатый	2,2	16	18	1,47	0,98	0,27	$3,7 \cdot 10^{-2}$	2,4	128,5
3	Насадочный	2,2	-	26,5	1,4	0,99	0,28	$7,7 \cdot 10^{-2}$	2,38	118,2

где D_k – диаметр колонны, м; n – число тарелок, шт; H – высота насадки, м; R – флегмовое число; η_t – тепловой КПД; η_e – эксергетический КПД; E – энергетический коэффициент; Q – тепловая нагрузка кипятильника, млн. ккал/ч; i – фактор интенсивности. Колонна до модернизации имела $\eta_e=0,23$.

Выводы

Основные конструктивные и энергетические характеристики вариантов модернизации колонны К-48 представлены в табл. 5.

В результате термодинамического анализа установлено, что эксергетический КПД выше у колонны с насадками, чем у колонны до модернизации. Наибольшее преимущество почти по всем показателям имеет насадочный вариант модернизации колонны.

Выполнено внедрение новой колонны с насадкой. Промышленная эксплуатация подтвердила правильность разработанных научно-технических решений. Повысилось качество фенола, производительность установки увеличена на 30 % и снизились энергозатраты на единицу продукции на 45 % (данные промышленной эксплуатации) на процесс ректификации по сравнению с колонной до модернизации. Срок окупаемости модернизации установки составил 1,1 года.

Литература

1. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Теоретические основы и моделирование процессов разделения веществ. Казань: Изд-во Казанского университета, 1993. 437 с.
2. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Определение эффективности массообменных устройств на основе сопряженного физического и математического моделирования // Теоретические основы химической технологии. 1992. Т. 26. № 1. С. 33-42.
3. Дьяконов С.Г., Елизаров В.И., Лаптев А.Г. Модель массоотдачи в барботажном слое контактного устройства на основе концепции активного (входного) участка // Теоретические основы химической технологии. 1991. Т. 25. № 6. С.783- 795.
4. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. 500 с.
5. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии. Казань: КГЭУ. 2010. 570 с.
6. Кудряшов В.Н. ОАО «Казаньоргсинтез»: вчера, сегодня, завтра // «Передовые технологии и перспективы развития ОАО «Казаньоргсинтез»»: междунар. юбилейная науч.-практ. конф. Казань. 2008. С. 9-11.
7. Лаптев А.Г., Кудряшов В.Н., Габутдинов М.С. и др. Совместные научно-технические разработки инженерно-внедренческого центра «Инжехим» с ОАО «Казаньоргсинтез» // сб. Трудов юбилейной науч.-практ. конф. Посвященной 40-летию ОАО «Казаньоргсинтез». Казань. 2003. С. 254-259.

8. Башаров М.М., Лаптев А.Г. Энергосбережение в производстве фенола // Вестник КГЭУ. 2010. №3. С. 14-17.

9. Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие. Киев: наук. Думка. 1991. 280с.

10. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Башаров М.М. Массообменная и энергетическая эффективность колонн с насадками// Химическая техника. 2010. №10. С. 12-14.

POWER SAVING UP MODERNIZATION THE PHENOL RECOVERY UNIT

M.M. Basharov

*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
e-mail: tv_t_kgeu@mail.ru*

Abstract. *Energy saving in the petrochemical and other industries is becoming increasingly important trend. In the last decade, many industrial enterprises to perform upgrades or replacement of equipment to improve product quality and reduce energy costs. At Kazanorgsintez are tasked with increasing the productivity of rectifying plant production of phenol and acetone to improving the quality of separation. Thermodynamic analysis is widely used to evaluate the exergy efficiency of industrial processes. To date, the technique of thermodynamic analysis and, particularly, the most modern of its variants – exergic analysis. To analyze the thermodynamic efficiency of energy systems and teplotekhnologii industrial production, were essential components of heat exergic vector and expendable features. As a result of thermodynamic analysis showed that the exergy efficiency is higher in the column with nozzles than in the column before the upgrade.*

Keywords: *regular roll nozzle, perforated tray, distillation column, phenol, exergy analysis and modernization*

References

1. D'yakonov S.G., Elizarov V.I., Laptev A.G. Teoreticheskie osnovy i modelirovanie protsessov razdeleniya veshchestv (The theoretical basis and simulation of separation of substances). Kazan State University Publishing House, 1993. 437 p.
2. D'yakonov S.G., Elizarov V.I., Laptev A.G. Opredelenie effektivnosti massoobmennykh ustroystv na osnove sopryazhennogo fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya (Determination of the efficiency of mass transfer devices based on the combined physical and mathematical modeling) *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 1992, Vol. 26, Issue 1. pp. 33-42.
3. D'yakonov S.G., Elizarov V.I., Laptev A.G. Model' massootdachi v barbotazhnom sloe kontaktnogo ustroystva na osnove kontseptsii aktivnogo (vkhodnogo) uchastka (Model of mass transfer in the bubbling layer contact device based on the concept of the active (input) section), *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 1991, Vol. 25, Issue 6. pp. 783-795.
4. Laptev A.G. Modeli pogranichnogo sloya i raschet teplomassobmennykh protsessov (The boundary layer model and calculation of the heat and mass transfer processes). Kazan State University Publishing House, 2007. 500 p.
5. Laptev A.G., Farakhov M.I., Mineev N.G. Osnovy rascheta i modernizatsiya teplomassobmennykh ustanovok v neftekhimii (Fundamentals of calculation and modernization of heat and mass transfer units in the petrochemical industry). Kazan: Kazan State Power Engineering University. 2010. 570 p.

6. Kudryashov V.N. OAO «Kazan'orgsintez»: vchera, segodnya, zavtra (Kazanorgsintez JSC: yesterday, today and tomorrow) in “*Peredovye tekhnologii i perspektivy razvitiya OAO “Kazan'orgsintez”*: mezhdunar. yubileinaya nauch.-prakt. konf. (“*Advanced technologies and development prospects of Kazanorgsintez JSC*”, *Int. jubilee sci.-pract. conf.*). Kazan, 2008. pp. 9-11.

7. Laptev A.G., Kudryashov V.N., Gabutdinov M.S. i dr. Sovmestnye nauchno-tekhnicheskie razrabotki inzhenerno-vnedrencheskogo tsentra «Inzhekhim» s OAO «Kazan'orgsintez» (Joint scientific and technical developments made by engineering innovation center Inzhehim with Kazanorgsintez JSC) in *sb. trudov yubileinoi nauch.-prakt. konf. posvyashchenoi 40-letiyu OAO “Kazan'orgsintez”* (*Proceedings of the jubilee scientific-practical. conf. devoted to the 40-th anniversary of Kazanorgsintez JSC*). Kazan. 2003. pp. 254-259.

8. Basharov M.M., Laptev A.G. Energoberezhenie v proizvodstve fenola (Energy conservation in the production of phenol), *Vestnik KGEU*, 2010, Issue 3. pp. 14-17.

9. Brodyanskii V.M., Verkhivker G.P., Karchev Ya.Ya., e.t.c. Eksergeticheskie raschety tekhnicheskikh sistem: sprav. posobie (Exergetic calculations of technical systems: a reference manual). Kiev: Naukova dumka, 1991. 280 p.

10. Laptev A.G., Farakhov M.I., Basharov M.M. Massoobmennaya i energo-licheskaya effektivnost' kolonn s nasadkami (Mass transfer and energy efficiency of columns with nozzles), *Khimicheskaya tekhnika*, 2010, Issue 10. pp. 12-14.