

А.Н. СУЛИМА, канд. техн. наук, *И.А. СУЩЕНКО*, канд. техн. наук,
И.П. ШЕПОТЬКО, *Т.Г. ЯШИНА*, *Т.А. КУРОЧКА*, *М.Ю. ВАСЮК*,
С.П. НЕГОДА, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОЛОННЫ ДЛЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

У статті наведені результати досліджень процесу ректифікації згідно з випарювально-конденсаційним методом у порожній горизонтальній колоні. Визначені конструктивні та технологічні параметри, що впливають на ефективність роботи колони. Показано, що апарати, які працюють згідно з випарювально-конденсаційним методом, перспективні щодо використання їх у разі розділення термонестійких органічних речовин під вакуумом.

В статье приведены результаты исследований процесса ректификации испарительно-конденсационным методом в пустой горизонтальной колонне. Определены конструктивные и технологические параметры, влияющие на эффективность работы колонны. Показано, что аппараты, работающие по испарительно-конденсационному методу перспективны при использовании их в случаях разделения термонестойких органических веществ под вакуумом.

In the article the results of researches of process of rectification are resulted on an evaporated-condensation method in a hollow horizontal column. Structural and technological parameters, influencing on efficiency of work of column, are certain. One can see that apparatus, workings on an evaporated-condensation method perspective for application at the division of thermally not proof of organic matters under a vacuum.

В химической и смежных отраслях промышленности для разделения термонестойких смесей обычно используют роторные пленочные аппараты, обладающие поверхностями испарения и конденсации. В этих аппаратах получают несколько теоретических тарелок на 1 метр высоты аппарата. Роторные аппараты работают при больших окружных скоростях ротора, и основной проблемой надежности работы таких аппаратов является наличие вращающегося ротора с лопатками, требующего большой точности изготовления и сборки. Для вала ротора требуется надежное уплотнение. Изготовление роторных аппаратов дорого обходится потребителю.

Обычные методы перегонки и ректификации требуют нагрева разделяемых смесей до температуры кипения, что практически трудно реализовать для термонестойких и высококипящих смесей при атмосферном давлении. Ограниченная термическая стойкость и недопустимость разложения разде-

ляемых смесей при нагревании в процессе ректификации требует разработки специальных конструкций аппаратов с малым гидравлическим сопротивлением, что обеспечивает возможность ведения процесса в глубоком вакууме.

В настоящей статье приведены результаты исследований процесса разделения смесей с использованием испарительно-конденсационного метода (ИКМ) в горизонтальной полой ректификационной колонне, не имеющей движущихся частей. На основании полученных результатов предложена конструкция горизонтальной ректификационной колонны.

Процесс, протекающий по всей длине колонны, можно рассматривать как последовательное одновременное частичное испарение и частичную конденсацию. При этом изучается влияние силы тяжести падающей с поверхности конденсации капли на поверхность испарения жидкости на образование в колонне поверхности массопередачи. Пар, образовавшийся на поверхности испарения, конденсируется над этой поверхностью и капли с поверхности конденсации вновь падают на ту же поверхность испарения. Конструктивно это оформляется таким образом: верхняя часть колонны охлаждается, а нижняя нагревается. Можно многократно испарять и конденсировать смесь на всем протяжении колонны по типу роторных пленочных аппаратов.

Задачами исследований являлось определение влияния конструктивных и технологических параметров на эффективность работы колонны, работающей по ИКМ, с подводом и отводом тепла. Изучались следующие параметры: величина зазора (расстояния между поверхностями испарения и конденсации) и их типы (трубчатка, полусфера, гладкая, плоская с дополнительными змеевиками). При определении влияния технологических параметров на эффективность работы колонны исследовались: скорость паровой фазы в свободном сечении колонны, соотношение теплот испарения и конденсации, толщины слоя жидкости на поверхности испарения, перемешивания жидкости на поверхности испарения.

С целью получения данных для разработки эффективной конструкции колонны исследовались 8 вариантов аппаратурного оформления процесса с вышеприведенными поверхностями испарения и конденсации. В первом варианте была изготовлена колонна прямоугольного сечения. Поверхности испарения и конденсации были выполнены в виде трубчаток из параллельно расположенных труб в продольном направлении. Для удобства наблюдений за процессами испарения и конденсации в боковых стенках колонны вставлены смотровые стекла. Технологическая схема экспериментальной установ-

ки приведена на рис. 1.

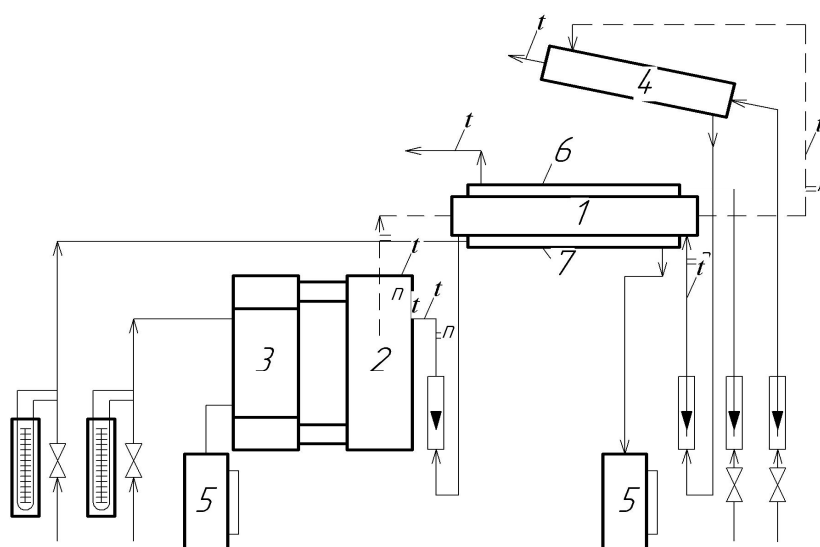


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки:
1 – колонна; 2 – куб; 3 – кипятильник; 4 – дефлегматор; 5 – мерник;
6 – поверхность конденсации (конденсатор); 7 – поверхность испарения (испаритель);
t – термометр; n – пробоотборник.

Работа горизонтальной колонны организована по следующей схеме: пар из куба (2) поступает в колонну (1) и попадает на охлаждаемую водой поверхность – конденсатор (6), где происходит частичная конденсация пара. За счет этого происходит обогащение пара низкокипящим компонентом. Проходя через колонну, пар попадает в дефлегматор (4), где конденсируется. Конденсат в виде флегмы полностью возвращается в колонну, т.е. флегмовое число $R = \infty$.

Флегма по колонне движется к кубу навстречу пару, смешиваясь при этом с частью конденсата. Подогреваясь, паром испарителя (7), флегма доводится до кипения и частично испаряется. Получаемый при этом пар более насыщен низкокипящим компонентом, чем сама флегма. Пар, получаемый при испарении, смешивается со стержневым паром. Флегма, пройдя колонну, возвращается в куб (2). Испарение смеси в кубе происходит за счет тепла трубчатого кипятильника (3), обогреваемого паром. Процесс, протекающий по длине колонны, можно рассматривать как последовательное многократное частичное испарение и частичную конденсацию. В результате пар при выходе из колонны обогащается низкокипящим компонентом, жидкость на выходе из колонны обогащается высококипящим компонентом.

В качестве исходной смеси для разделения принята хорошо изученная

смесь этанол - вода с концентрацией спирта от 10 до 60 мол. %.

После выхода на постоянный режим производится отбор проб смеси из пробоотборных устройств в установленных точках. Схема материальных потоков в колонне для легколетучего компонента приведена на рис. 2.

Материальный баланс для потока пара по длине колонны L равен:

$$D_k = D_H + G_n - G_{k0}, \quad (1)$$

где: D_H – количество пара, поступающего из куба в колонну, кг/ч; D_k – количество пара, образовавшегося в колонне, кг/ч; G_n – количество пара, получаемого на греющей поверхности внутри аппарата; y_n – концентрация легколетучего компонента в паре на входе в колонну, % мол; G_k количество конденсата, получаемого с поверхности конденсатора, кг/ч; Φ_k – количество орошения на входе в колонну, кг/ч; Φ_n – количество орошения на выходе из колонны, кг/ч; x_{k0} – концентрация легколетучего компонента в конденсате, мол. %; x_n – концентрация легколетучего компонента в жидкости на входе в колонну, мол. %; D_k – количество пара на выходе из колонны, кг/ч; y_k – концентрация легколетучего компонента в паре на выходе из колонны, мол. %; x_k – концентрация легколетучего компонента в жидкости на выходе из колонны, мол. %.

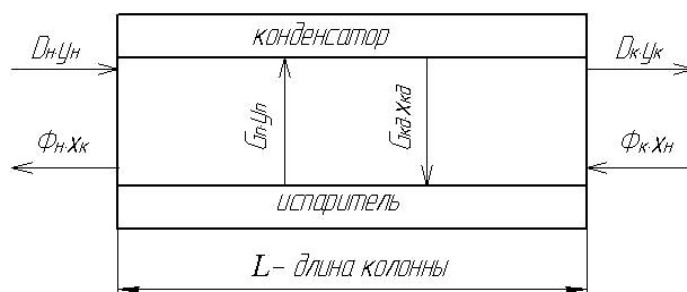


Рис. 2. Схема материальных потоков

Отношение количества пара, сконденсировавшегося на поверхности конденсации $G_{конд}$ к количеству пара, поступающего из куба в колонну D_H называется кратностью конденсации K .

$$K = \frac{G_{конд.}}{D_H}; \quad (2)$$

Отношение количества пара, испарившегося с поверхности испарения $G_{исп.}$ к количеству пара, поступающего из куба D_H называется кратностью испарения:

$$K_{исп.} = \frac{G_{исп.}}{D_H}; \quad (3)$$

Теоретическая мера разделения I_k , достигаемого по длине колонны, определяется:

$$I_k = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1}(y_k - y_n) + \frac{\alpha}{\alpha^2 - 1} \ln \frac{y_k(1 - y_k)}{y_n(1 - y_n)}; \quad (4)$$

где α – относительная летучесть, принимаемая для среднего значения между начальной и конечной концентрацией легколетучего компонента.

Теоретически величины K и I_k должны быть равновелики. Фактически полученное число ступеней разделения оказывается меньшим, и расхождение вычисляется, как $\eta = \frac{I_k}{K}$. Значение η лежит в пределах между 0 и 1 и представляет собой коэффициент полезного действия всего процесса. Для каждого режима эффективность разделения в колонне оценивалась числом теоретических тарелок на 1 метр длины.

Горизонтальная колонна с поверхностями испарения и конденсации относится к аппаратам, в которых поверхность контакта фаз образуется в свободном объеме. Перенос массы интенсифицируется вследствие образования высокоразвитой быстро обновляющейся поверхности массообмена за счет наличия эффекта дробления капель.

Организация процессов испарения и конденсации на соответствующих поверхностях исключает применение тарелок или насадок. Это способствует движению пара по сечению колонны практически без сопротивления.

Пар, перемещаясь в секции аппарата противотоком к флегме, многократно проходит через зону, где диспергируется жидкость.

Взаимодействие фаз происходит в канале между поверхностями испарения и конденсации.

Непрерывное обновление межфазной поверхности способствует интенсификации работы диффузионных аппаратов, и сводит до минимума эффект продольного перемешивания. Отклонение от поршневого режима течения фаз является следствием осевого рассеивания под влиянием турбулентной диффузии (перемешивания) и молекулярной диффузии.

Одна из основных задач проектирования аппарата – уменьшение размеров оборудования за счет создания большой поверхности контакта фаз. Парожидкостные контактные аппараты можно создать малогабаритными за

счет организации процесса диспергирования одной фазы в виде маленьких капелек или пузырьков, из которых образуется поверхность контакта фаз.

Путем создания условий для развития поверхности контакта фаз можно достичь более эффективной работы аппарата за счет увеличения площади межфазного контакта в единице объема.

Структура парожидкостного слоя в сечении горизонтальной колонны зависит от нагрузки по пару и тепловых нагрузок.

Рабочими параметрами этих поверхностей являются кратности испарения и конденсации.

В таких аппаратах резко улучшается перенос массы за счет высокоразвитой и полностью обновляющейся поверхности, образующейся в свободном объеме между поверхностями испарения и конденсации.

Достоинством горизонтальной колонны является отсутствие пристенного эффекта. Малый уровень жидкости на поверхности испарения исключает обратное перемешивание.

На рабочей площади колонны (поверхность испарения) отсутствуют застойные зоны.

Исследованы 8 вариантов конструкции колонн с различными рабочими поверхностями и расстояниями между ними.

Наибольшая эффективность работы получена при пленочном режиме конденсации и испарения разделяемой смеси, т.е. на колонне, выполненной из трубы и в колонне с полуцилиндрической поверхностью испарения и конденсации (рис. 3 и рис. 4).

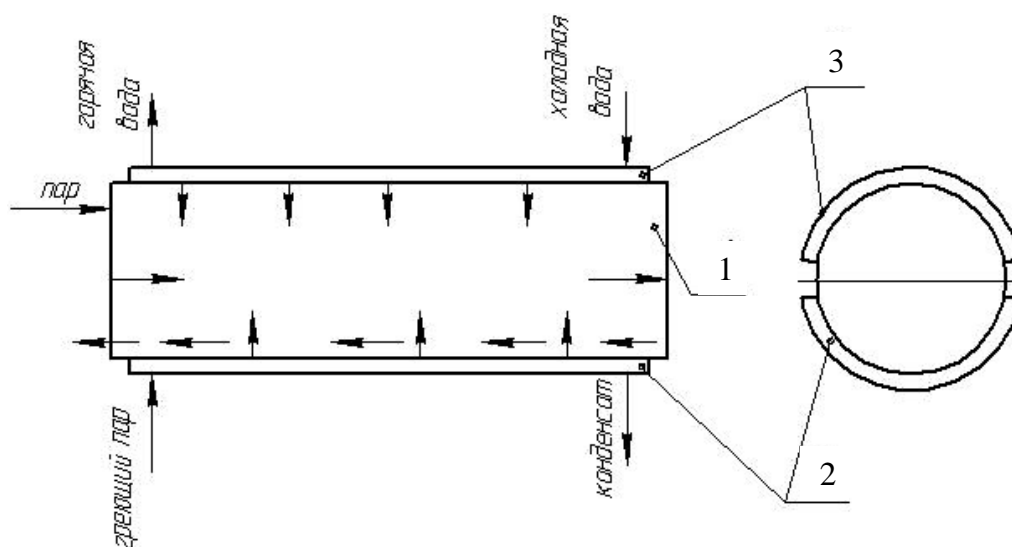


Рис. 3. Схема модели колонны, выполненной из трубы $\varnothing 70$ мм:
1 – труба; 2 – паровая рубашка; 3 – водяная рубашка.

В пересчете на 1 метр рабочей длины колонны получен эффект разделения, равный 5 теоретическим тарелкам (при бесконечном флегмовом числе).

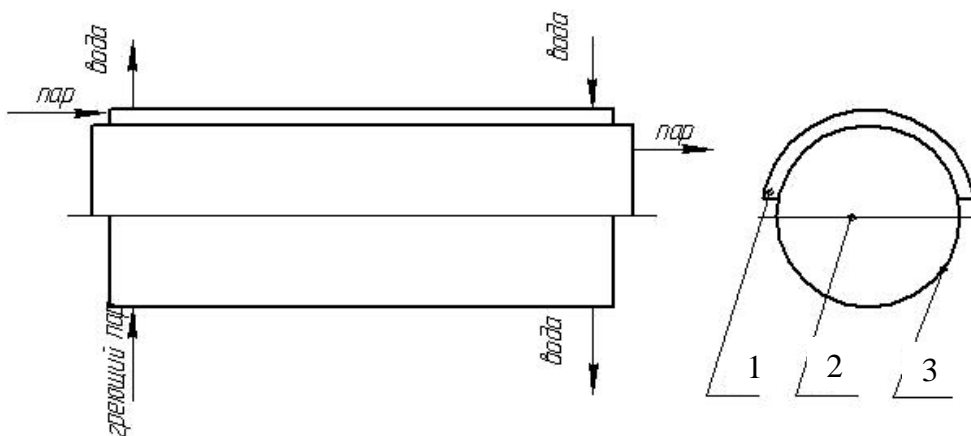


Рис. 4. Схема модели колонны с полуцилиндрической поверхностью конденсации и плоским дном (диаметр трубы 100 мм):
1 – водяная рубашка; 2 – перегородка; 3 – паровая рубашка.

Зависимость числа теоретических тарелок от кратности конденсации в колонне представлен на рис. 5 и рис. 6.

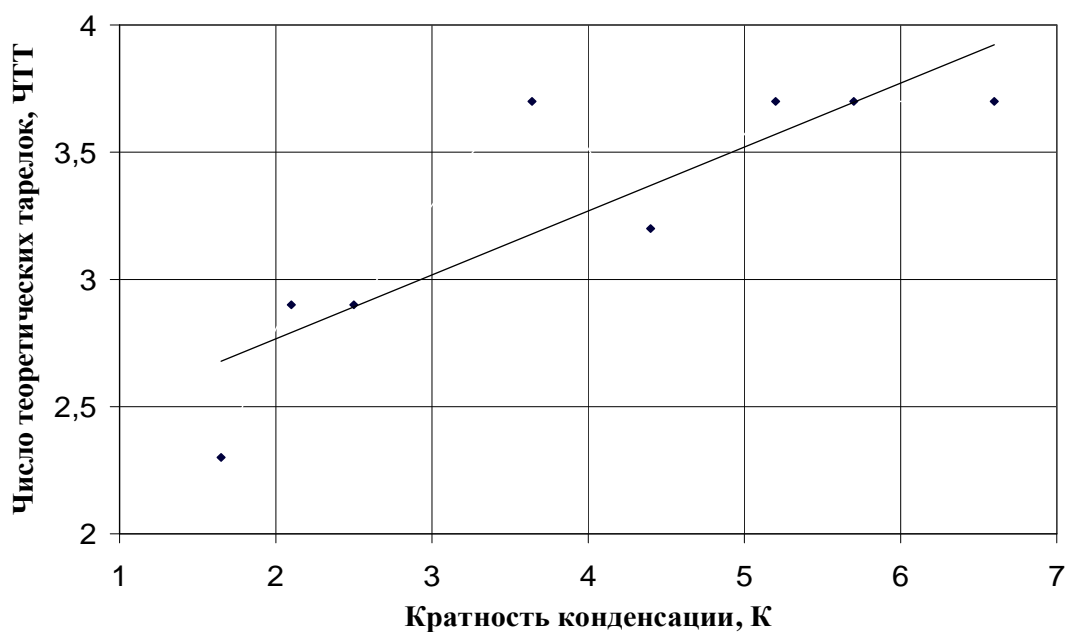


Рис. 5. Зависимость числа теоретических тарелок от кратности конденсации в колонне из трубы $\varnothing 70$ мм

На графиках (рис. 7) приведены результаты разделения смеси этанол-вода в колонне длиной 0,8 м.

Результаты исследований подтвердили возможность применения ИКМ

для разделения жидких смесей в горизонтальной безнасадочной колонне в вакуумных процессах ректификации термонестойких органических веществ.

Получены необходимые данные для разработки технической документации на такие аппараты.

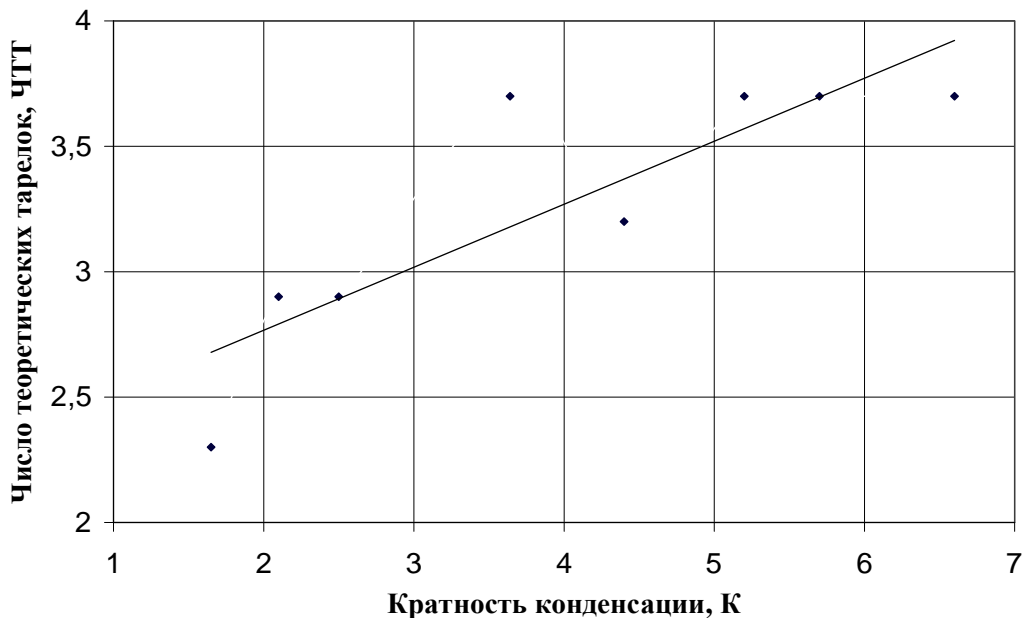


Рис. 6. Зависимость числа теоретических тарелок от кратности конденсации в колонне с плоским дном и полуцилиндром

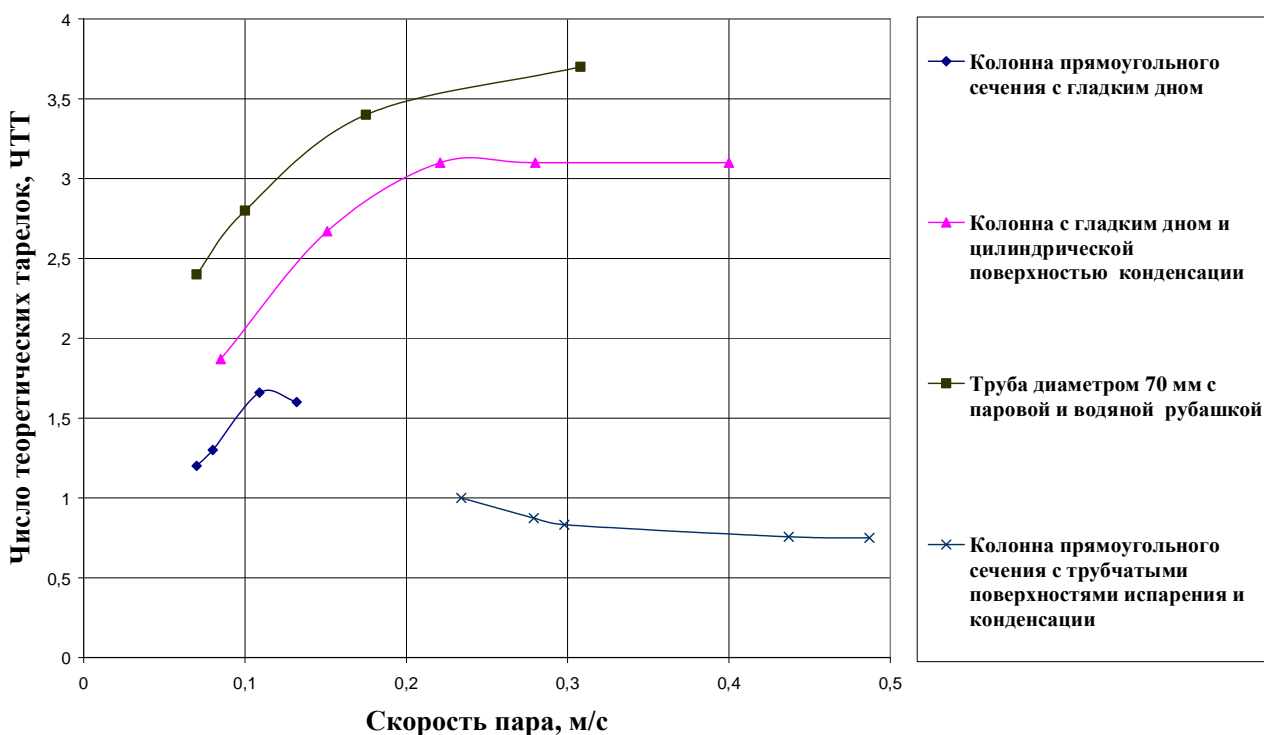


Рис. 7. Зависимость числа теоретических тарелок от скорости пара

Применение таких колонн, например, целесообразно в производстве синтетических жирных кислот вместо дистилляционных кубов.

При дистилляции происходит термическое разложение продукта, в результате чего образуются примеси, идущие в отходы.

Накопление примесей ведет к снижению качества готового продукта.

Применение горизонтальных колонн, работающих по ИКМ, дает возможность снизить потери продукта при дистилляции в кубах примерно на 90 %.

При изготовлении на заводе колонны горизонтального типа ее стоимость будет меньше, чем роторного аппарата при равной производительности.

Колонна проще в изготовлении, т.к. отсутствуют вращающийся элемент – ротор, уплотнение вала.

Поэтому горизонтальные колонны предпочтительнее для вакуумных процессов, чем роторные аппараты.

Список литературы: 1. Шервуд Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки; пер. с англ. Н.Н. Кулова. – М.: Химия, 1982. – 696 с. 2. Кафаров В.В. Основы массопередачи / В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1962. – 655 с. 3. Молоканов Ю.К. Разделение смесей кремнийорганических соединений / Ю.К. Молоканов. – М.: Химия, 1974. – 295 с. 4. Марченко А.Н. Теплопередача в роторных пленочных аппаратах / А.Н. Марченко // Химическое, нефтеперерабатывающее и целлюлозно-бумажное машиностроение. – 1966. – №9. – С.12.

Поступила в редколлегию 25.03.10