

И. Ф. МАЛЕЖИК

ВЫВОД ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ В ТАРЕЛЬЧАТОЙ КОЛОННЕ

Для осуществления полного подобия в межтарелочной зоне ректификационного аппарата необходимо обеспечить подобие процесса массообмена, пенообразования и уноса.

В настоящее время, благодаря работам многих исследователей [1—18], выявлены те факторы, которые оказывают влияние на процессы, происходящие на тарелке. В связи с этим стало возможным, пользуясь методом анализа размерностей, получить обобщенную критериальную зависимость, описывающую подобие процессов ректификации.

В качестве определяемого критерия в уравнениях, характеризующих процессы, происходящие в ректификационном аппарате, могут быть приняты диффузионный критерий Нуссельта [7], критерий Маргулеса для массопередачи [8], критерий массопередачи $M = \frac{kF}{G}$ [4, 5], где k —коэффициент массопередачи, F —поверхность межфазового контакта, G —молярный расход пара и, наконец, коэффициент полезного действия (коэффициент обогащения) тарелки [4, 6]. Все эти критерии связаны между собой и могут заменять друг друга.

В связи с тем, что наибольший практический интерес представляет коэффициент полезного действия (к.п.д.) тарелки, мы приняли в качестве определяемого критерия средний к.п.д. тарелки η . В качестве независимых переменных примем факторы, которые оказывают непосредственное влияние на процесс массообмена в колонне или влияют на брызгоунос и пенообразование на тарелке:

ω —скорость пара в свободном сечении колонны в м/сек;

$\gamma_{жс}$ —удельный вес жидкости в кг/м³;

γ_n —удельный вес пара в кг/м³;

σ —поверхностное натяжение жидкости в кг/м;

$\gamma_{жс}$ —кинематическая вязкость жидкости в м²;

γ_n —кинематическая вязкость пара в м²/сек;

$D_{жс}$ —коэффициент диффузии для жидкой фазы в м²/сек;

D_n —коэффициент диффузии для паровой фазы в м²/сек;

m —тангенс угла наклона кривой фазового равновесия, равный

$\frac{dy}{dx}$, — величина безразмерная;

$\frac{L}{G}$ —отношение жидкостного и парового потоков, характеризующее влияние флегмового числа, — величина безразмерная;

d_e —эквивалентный диаметр паровпускного отверстия в м;

h —высота сливной перегородки или уровня жидкости на тарелке в м;
 $(H-h)$ —высота парового пространства, равная разности между межтарелочным расстоянием H и уровнем жидкости h , в м;
 F_c —живое (свободное) сечение тарелки, оказывающее влияние на входную скорость пара, — величина безразмерная;
 D —внутренний диаметр колонны в м.

Следовательно, мы можем записать:

$$\eta = f\left[\omega, \gamma_{ж}, \gamma_n, \sigma, \gamma_{ж}, \gamma_n, D_{ж}, D_n, m, \frac{L}{G}, d_э, h(H-h), F_c, D\right]. \quad (1)$$

В приведенной зависимости насчитывается 16 переменных величин, размерность которых определяется при помощи трех основных единиц измерения. Согласно π -теореме, искомое уравнение должно состоять из 13 безразмерных параметров.

Выделяем безразмерные симплексы η , m , $\frac{L}{G}$ и F_c , а также безразмерные критерии геометрического подобия $\frac{h}{d_э}$, $\frac{H-h}{h}$ и $\frac{D}{h}$ и объединяем их в одну величину π . Выразим оставшиеся независимые переменные уравнения (1) в виде степенной зависимости:

$$\pi = \omega^a \gamma_{ж}^b \gamma_n^c \sigma^i \gamma_{ж}^k \gamma_n^l D_{ж}^p D_n^q d_э^r, \quad (2)$$

где: π —безразмерный параметр;
 $a, b, c, i, k, l, p, q, r$ —безразмерные показатели степени.

В уравнение (2) вместо физических величин подставим соответствующие им размерности, принятые в технической системе единиц измерений:

$$\pi = \left[\frac{м}{сек}\right]^a \left[\frac{кг}{м^3}\right]^b \left[\frac{кг}{м^3}\right]^c \left[\frac{кг}{м}\right]^i \left[\frac{м^2}{сек}\right]^k \left[\frac{м^2}{сек}\right]^l \left[\frac{м^2}{сек}\right]^p \left[\frac{м^2}{сек}\right]^q [м]^r.$$

После объединения показателей степени при одинаковых единицах измерений получим:

$$\pi = [кг]^{b+c+i} [м]^{a-3b-3c-i+2k+2l+2p+2q+r} [сек.]^{-a-k-l-p-q}$$

Составляем систему уравнений:

$$(кг) \quad b + c + i = 0;$$

$$(м) \quad a - 3b - 3c - i + 2k + 2l + 2p + 2q + r = 0;$$

$$(сек.) \quad -a - k - l - p - q = 0.$$

Так как мы имеем три уравнения, то три неизвестные величины можно исключить.

Исключая b, l и r , получим:

$$b = -c - i;$$

$$l = -a - k - p - q;$$

$$r = a - 2i.$$

Перепишем уравнение (2):

$$\pi = \omega^a \gamma_{ж}^{-c-i} \gamma_n^c \sigma^i \gamma_{ж}^k \gamma_n^{-a-k-p-q} D_{ж}^p D_n^q d_э^{a-2i},$$

или

$$\pi = \omega^a \gamma_{ж}^{-c} \gamma_{ж}^{-i} \gamma_n^c \sigma^i \gamma_{ж}^k \gamma_n^{-a} \gamma_n^{-k} \gamma_n^{-p} \gamma_n^{-q} D_{ж}^p D_n^q d_э^a d_э^{-2i}.$$

Группируя независимые переменные с одинаковыми показателями степени, получаем:

$$\pi = \left(\frac{wd_s}{v_n} \right)^a \left(\frac{\sigma}{\gamma_{жс} d_s^2} \right)^i \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_{жс}} \right)^c \left(\frac{v_{жс}}{v_n} \right)^k \left(\frac{D_{жс}}{v_n} \right)^p \left(\frac{D_n}{v_n} \right)^q.$$

Рассматривая выражение полученных безразмерных параметров, мы видим, что первый параметр представляет собой критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{wd_s}{v_n};$$

второй — критерий Вебера:

$$We = \frac{\sigma}{\gamma_{жс} d_s^2}.$$

Заменив в пятом параметре v_n на $v_{жс}$ и поменяв числитель и знаменатель местами, получим критерий Прандтля для жидкости:

$$Pr_{жс} = \frac{v_{жс}}{D_{жс}}.$$

Поменяв в шестом параметре числитель и знаменатель местами, получим критерий Прандтля для пара:

$$Pr_n = \frac{v_n}{D_n}.$$

После подстановки вместо величины π ранее выделенных безразмерных параметров уравнение (1) принимает следующую безразмерную форму:

$$\eta = f \left(\frac{wd_s}{v_n}, \frac{\sigma}{\gamma_{жс} d_s^2}, \frac{v_{жс}}{D_{жс}}, \frac{v_n}{D_n}, \frac{v_{жс}}{v_n}, \frac{\gamma_n}{\gamma_{жс}}, m, \frac{L}{G}, \frac{h}{d_s}, \frac{H-h}{h}, F_c, \frac{D}{h} \right), \quad (3)$$

или

$$\eta = f \left(Re, We, Pr_{жс}, Pr_n, \frac{v_{жс}}{v_n}, \frac{\gamma_n}{\gamma_{жс}}, m, \frac{L}{G}, F_c, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3 \right), \quad (4)$$

где

$$\Gamma_1 = \frac{H-h}{h}, \quad \Gamma_2 = \frac{D}{h} \quad \text{и} \quad \Gamma_3 = \frac{h}{d_s}.$$

Произведем некоторые упрощения и замены в критериальных уравнениях (3 и 4).

В критерии Вебера линейный размер d_s заменим размером $(H-h)$, который более характерен для этого критерия при рассмотрении процессов, происходящих на барботажной тарелке.

Поскольку в ректификационных аппаратах спиртовых заводов мы имеем дело с хорошо растворимым компонентом — этиловым спиртом, а массопередача паров, состоящих из хорошо растворимых компонентов, лимитируется в основном диффузией (турбулентной или молекулярной) в газовой (паровой) фазе, то критерий Прандтля для жидкости может быть из уравнения исключен.

Из критериальных уравнений (3 и 4) можно исключить также критерий геометрического подобия $\frac{h}{d_s}$, поскольку он состоит из величин, входящих в другие критерии.

Таким образом, уравнение (3) примет вид:

$$\eta = f\left(\frac{w a_s}{v_n}, \frac{\sigma}{\gamma_{жс} (H-h)^2}, \frac{v_n}{D_n}, \frac{\gamma_{жс}}{v_n}, \frac{\gamma_n}{\gamma_{жс}}, m, \frac{L}{G}, \Gamma_1, \Gamma_2, F_c\right), \quad (5)$$

или

$$\eta = f\left(\text{Re}, \text{We}, \text{Pr}_n, \frac{\gamma_{жс}}{v_n}, \frac{\gamma_n}{\gamma_{жс}}, m, \frac{L}{G}, \Gamma_1, \Gamma_2, F_c\right). \quad (6)$$

Полученное критериальное уравнение (6) может быть записано в следующей форме:

$$\eta = A \text{Re}^\alpha \text{We}^\beta \text{Pr}_n^\delta \left(\frac{\gamma_{жс}}{v_n}\right)^\varepsilon \left(\frac{\gamma_n}{\gamma_{жс}}\right)^\zeta m^\pi \left(\frac{L}{G}\right)^\varphi \Gamma_1^\phi \Gamma_2^\lambda F_c^\omega. \quad (7)$$

Коэффициент A и показатели степени $\alpha, \beta, \delta, \varepsilon, \zeta, \pi, \varphi, \psi, \lambda, \omega$ в уравнении (7) должны быть найдены экспериментально.

Поскольку полученное в общем виде критериальное уравнение (7) содержит большое количество критериев, то получить зависимость между ними практически очень трудно. Поэтому при последующем накоплении экспериментальных данных уравнение (7) нужно будет упростить, исключив из него те критерии, влияние которых на к.п.д. тарелки окажется незначительным.

*
* *

Опыты по исследованию эффективности тарелок проводились при перегонке водно-спиртовой смеси в колонне внутренним диаметром 257 мм, оборудованной 17—20 клапанными тарелками. Расстояние между тарелками составляло 300 мм, высота сливной перегородки 40 мм.

Поскольку мы не ставили себе целью исследовать влияние на к.п.д. тарелки всех переменных величин, входящих в критериальное уравнение (7), при обработке опытных данных было выявлено влияние только некоторых из них. Прежде всего было найдено числовое значение показателя степени α , который отражает влияние на к.п.д. одного из наиболее важных факторов критерия Рейнольдса.

Для определения показателя степени α все опыты были разбиты на группы, в каждой из которых изменялся только критерий Re , а остальные критерии оставались постоянными и были включены в коэффициент B уравнения вида:

$$\eta = B \text{Re}^\alpha. \quad (8)$$

Искомый показатель степени α находили как тангенс угла наклона полученной в логарифмических координатах прямой линии. Числовое значение величины α определялось по методу средних. Усреднив полученные значения α для различных групп опытов, мы получим $\alpha = -0,55$.

Таким образом, уравнение (8) можно записать в виде:

$$\eta = B \text{Re}^{-0,55}. \quad (9)$$

Критерий $\frac{L}{G}$ в наших опытах изменялся в пределах $1,24 \div 7$. При увеличении его к.п.д. тарелок уменьшался очень незначительно. Влияние величины $\frac{L}{G}$ на к.п.д. было настолько мало, что показатель степени φ был близок к нулю. По данным Буровой [4], $\varphi = -0,05$. Вероятно, при уменьшении расстояния между тарелками, когда на к.п.д.

тарелок оказывает заметное влияние явление брызгоуноса, роль критерия $\frac{L}{G}$ повышается, так как с увеличением $\frac{L}{G}$ уменьшается влияние уноса на к.п.д. тарелок [16]. В наших же опытах расстояние между тарелками все время сохранялось равным 300 мм, поэтому брызгоунос почти не влиял на к.п.д. тарелок.

При обработке опытных данных было обнаружено незначительное увеличение к.п.д. при уменьшении концентрации спирта на тарелках, т. е. при увеличении величины критерия m . Но определить числовое значение показателя степени π при величине m нам не удалось, так как изменение концентрации спирта в жидкости на тарелках влияет не только на значение m , но и на величину критериев We , $\frac{\gamma_{жс}}{\gamma_n}$, Pr_n , Re

и $\frac{\gamma_n}{\gamma_{жс}}$. Поэтому устранить взаимовлияние перечисленных критериев при изменении концентрации спирта в жидкости (а следовательно, и в паре) довольно трудно. На основании опытных данных по исследованию эффективности ситчатых тарелок Бурова [4] нашла, что $\pi=0,1$, однако в более поздней работе Носкова, Буровой и Фельдеша [6] доказывается, что к.п.д. вообще не зависит от величины m . Обработывая опытные данные, Бурова определила значение показателя степени δ при критерии Pr_n . Он оказался равным — 0,2. Но и в отношении критерия Pr_n Носков, Бурова и Фельдеш пришли к заключению, что он не оказывает влияния на к.п.д. тарелки при отсутствии уноса жидкости паром.

Вероятно, этот вопрос требует еще дальнейшего изучения.

Поскольку в наших опытах расстояние между тарелками не изменялось, то для выявления влияния критерия $\frac{H-h}{h}$ на к.п.д. тарелки нами были обработаны экспериментальные данные Пиви и Бекера [17], которые исследовали работу колпачковой тарелки. В их опытах расстояние между тарелками составляло 150 и 300 мм при глубине барботажа 12, 25, 37 мм. Обработка опытных данных Пиви и Бекера показала, что с увеличением скорости пара в колонне влияние расстояния между тарелками на к.п.д. тарелки увеличивается, т. е. показатель степени ψ возрастает. Так, например, в опытах при статическом уровне жидкости на тарелке 25 мм и скорости пара в колонне $\omega=0,45$ м/сек $\psi=0,24$; при том же уровне жидкости, но при $\omega=0,6$ м/сек $\psi=0,43$; при $\omega=0,75$ м/сек $\psi=0,92$.

Показатель степени λ при критерии Γ_2 можно принять, согласно данным Носкова, Буровой и Фельдеша [6], равным 0,1.

Для нахождения неизвестных показателей степени β , ϵ , ζ , ω и коэффициента A , а также для уточнения и проверки показателей степени α , δ , π , ϕ , ψ , λ необходимо проведение большой экспериментальной работы с целью накопления опытных данных.

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа литературных данных с помощью метода анализа размерностей получена в общем виде критериальная зависимость, выражающая связь между коэффициентом полезного действия ректификационной тарелки и гидродинамическими, физико-химическими и конструктивными факторами.

2. Определена степень зависимости среднего к.п.д. тарелки от числа Рейнольдса на основании опытов, проведенных с клапанными тарелками.

3. На основании литературных данных, а также данных, полученных в результате проведенных опытов, показано ориентировочно влияние на к.п.д. тарелки критериев Pr_n , m , $\frac{L}{G}$, $\frac{D}{h}$ и $\frac{H-h}{h}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стабников В. Н., Исследование работы ректификационных аппаратов с колпачковыми тарелками, «Химическое машиностроение», 1937, № 2.
2. Стабников В. Н., Харин С. Е., Теоретические основы перегонки и ректификации спирта, Пищепромиздат, М., 1951.
3. Аношин И. М., Исследование аппаратов с ситчатыми тарелками для ректификации спирта, Автореферат, МТИП, 1952.
4. Бурова Г. В., Исследование процесса массопередачи на ситчатых ректификационных тарелках, Автореферат, ЛТИ им. Ленсовета, 1957.
5. Фельдеш П., Влияние физико-химических свойств разделяемых смесей на процесс массопередачи в тарельчатых ректификационных колоннах, Автореферат, ЛТИ им. Ленсовета, 1955.
6. Носков А. А., Бурова Г. В., Фельдеш П., Коэффициент обогащения одиночной ситчатой ректификационной тарелки, ЖПХ, вып. 10, 1959.
7. Кафаров В. В., О расчете процессов массопередачи, ЖПХ, вып. 5, 1958.
8. Мухленов И. П., Кинетика теплопередачи и массопередачи в пенном слое, ЖПХ, вып. 9, 1958.
9. Мухленов И. П., Тумаркина Е. С., Кинетика тепло- и массопередачи в пенном слое, ЖПХ, вып. 11, 1958.
10. Мухленов И. П., Исследование взвешенного слоя подвижной пены в ситчатых аппаратах, ЖПХ, вып. 1, 1958.
11. Дьяконов Г. К., Вопросы теории подобия в области физико-химических процессов, изд. АН СССР, М., 1956.
12. У Цзинь-чэн, Изучение явления пенообразования при пропускании газа через слой жидкости, Автореферат, ЛТИ им. Ленсовета, 1955.
13. Аксельрод Л. С., Дильман В. В., О высоте слоя эмульсии на барботажных тарелках, ЖПХ, вып. 12, 1956.
14. Марфенина И. В., Влияние уноса на коэффициент обогащения ректификационных тарелок, «Кислород», 1948, № 5.
15. Молоканов Ю. К., Скобло А. И., Механический унос жидкости газом в тарельчатых колоннах, Известия высших учебных заведений, «Нефть и газ», 1959, № 1.
16. Colburn A. P., Effect of Entrainment on Plate Efficiency in Distillation, Ind. and Eng. Chemistry, vol. 28, 1936, № 5.
17. Peavy C. C. and Baker E. M., Efficiency and Capacity of a Bubble-Plate, Ind. and Eng. Chemistry, vol. 29, 1937, № 9.
18. Stanislas D. H. and Smith A. G., Performance of distillation contacting Devices, International Symposium on Distillation, 4, 5, 6, May, 1960.

И. Ф. МАЛЕЖИК, В. Н. СТАБНИКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КЛАПАННЫХ ТАРЕЛОК

Ранее [1] мы рассмотрели результаты исследования гидродинамики одной из новых конструкций барботажных тарелок — клапанной тарелки. Но для того чтобы сделать заключение о пригодности тех или иных тарелок к работе в производственных условиях, недостаточно

изучить только вопросы гидродинамики. Поэтому в настоящей работе мы приведем результаты исследования эффективности клапанных тарелок, которая определялась при перегонке водно-спиртовой смеси в колонне с клапанными тарелками.

Цель исследования: изучение возможности применения клапанных тарелок для спиртовой части брагоперегонных аппаратов, а также для элюционных и ректификационных колонн брагоректификационных и ректификационных аппаратов в условиях спиртового производства;

определение коэффициента полезного действия тарелок;

определение оптимальной скорости пара в свободном сечении колонн;

изучение величины спиртосъема с единицы объема колонны.

Для исследования эффективности работы клапанных тарелок была

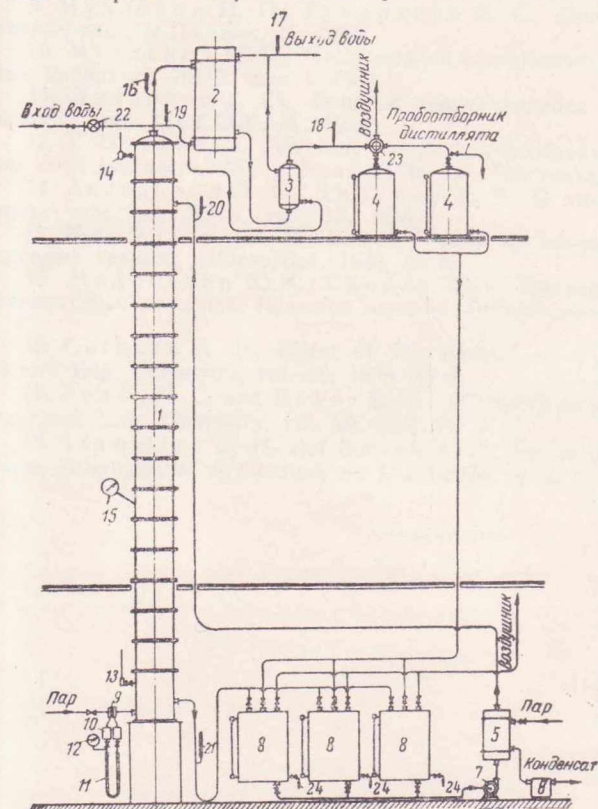


Рис. 1. Схема непрерывно действующей полупроизводственной ректификационной установки:

1—ректификационная колонна; 2—конденсатор; 3—холодильник; 4—сборник дистиллята; 5—подогреватель; 6—конденсационный гершок; 7—насос; 8—мерные баки для кубового остатка и приготовления водно-спиртовой смеси; 9—диафрагма; 10—конденсационные бачки; 11—дифманометр; 12—14—манометры; 15—манометрический термометр; 16—21—термометры; 22—водомер; 23—фонарь; 24—отвод кубового остатка.

изготовлена и смонтирована на Трилесском спиртовом заводе полужаводская ректификационная установка непрерывного действия. При проектировании этой установки были учтены требования теории подо-

В нашей опытной колонне были сохранены все наиболее существенные размеры образца (расстояние между тарелками, высота сливной перегородки, живое сечение тарелки, размеры отверстий, клапанов и т. д.), за исключением диаметра колонны, который был уменьшен. При таком моделировании удастся изучить как качественную картину протекающих явлений, так и количественные закономерности. Выводы, полученные на такой модели, достаточно хорошо подтверждаются в промышленных аппаратах.

Technical drawing of a circular mechanical component, showing a side view and a top view.

Side View Dimensions:

- Overall diameter: $\phi 346$
- Top flange diameter: $\phi 37$
- Bottom flange diameter: $\phi 37$
- Top flange height: 50
- Bottom flange height: 40
- Distance from left edge to top flange center: 88
- Distance from top flange center to bottom flange center: 87
- Distance from left edge to top flange center: 5
- Distance from top flange center to bottom flange center: 8

Top View Dimensions:

- Overall diameter: $\phi 346$
- Central hole diameter: $\phi 37$
- Inner hole diameter: $\phi 47$
- Inner hole diameter: $\phi 36$
- Distance from center to inner hole center: 44
- Distance from center to inner hole center: 12
- Distance from center to inner hole center: 80
- Distance from center to inner hole center: 36
- Distance from center to inner hole center: 40

Приготовленная для ректификации водно-спиртовая смесь из мерных баков 8 подавалась насосом 7 в трубчатый подогреватель 5. Смесь, подогретая до температуры, близкой к температуре кипения, направлялась на питательную тарелку ректификационной колонны.

Колонна обогревалась открытым паром через барботер. Водно-спиртовые пары, поднимаясь вдоль колонны, попадали в конденсатор 2, где конденсировались и охлаждались. Дополнительное охлаждение дистиллята происходило в холодильнике 3. Охлажденный дистиллят направлялся в один из мерников 4, а затем поступал в мерный бак 8, где смешивался с кубовым остатком, образуя начальную смесь. Излишнее количество кубового остатка выпускали в канализацию.

Установка была снабжена соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой и кранами для отбора проб жидкости и пара с каждой тарелки.

131

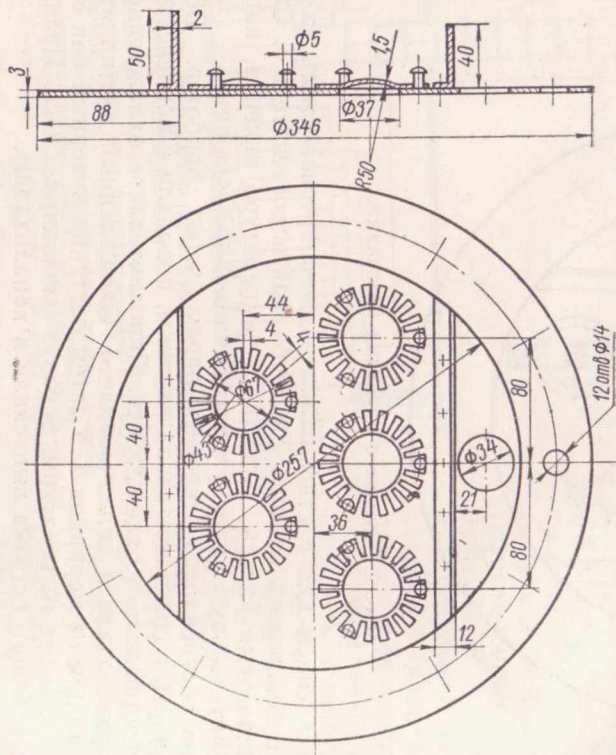


Рис. 3. Тарелка с круглыми клапанами с трапециевидными зубьями.

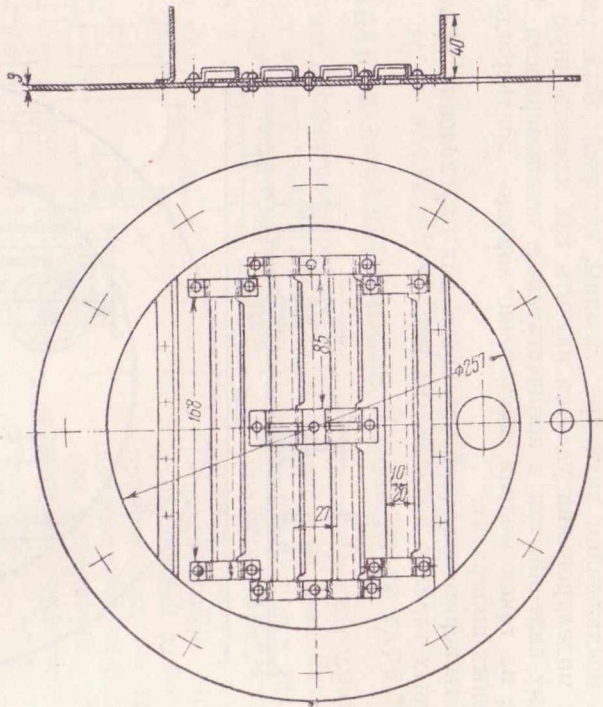


Рис. 4. Тарелка с пластинчатыми клапанами.

300 мм, высота сливной перегородки 40 мм, диаметр сливного стакана 30/33 мм.

Исследованию подвергались 3 типа клапанных тарелок: 1) с круглыми клапанами (рис. 2); 2) с круглыми клапанами с трапецевидными зубьями (рис. 3); 3) с пластинчатыми L-образными клапанами (рис. 4). Первые два типа тарелок имели по пять клапанов, третий тип — шесть клапанов. При исследовании второго типа в колонне было 19 тарелок, при исследовании первого и третьего типа — 17 тарелок.

В ходе проведения опытов изменяли нагрузку колонны по пару и жидкости, а также концентрацию этилового спирта в исходной водно-спиртовой смеси.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Количество расходуемого пара измеряли диафрагмой с отверстием диаметром 20,8 мм, установленной на паропроводе диаметром 2".

По расходу греющего пара определяли скорость пара в свободном сечении колонны по уравнению:

$$w = \frac{Pl_1}{i_2 \gamma_2 F 3600}, \quad (1)$$

где: w — скорость пара в свободном сечении колонны в м/сек;

i_1 — энтальпия греющего пара при давлении в паропроводе в ккал/кг;

i_2 — энтальпия греющего пара при рабочем давлении в колонне в ккал/кг;

γ_2 — удельный вес пара при рабочем давлении в колонне в кг/м³;

F — сечение колонны в м².

Для определения концентрации спирта в паре и жидкости на каждой тарелке колонны из соответствующих кранов через стеклянные холодильники отбирали пробы пара и жидкости после работы колонны в течение часа на стабильном режиме, который определялся постоянством температур по высоте колонны и постоянством расхода пара и жидкости.

Концентрацию спирта измеряли металлическим спиртомером, которым определялось содержание спирта в паре и жидкости от 0,2% об. и выше. Таким способом нами определялась концентрация спирта в паре и жидкости на всех тарелках, начиная с питательной и кончая той, на которой концентрация спирта в жидкости составляла примерно 0,2% об.

Величина ошибки при замере концентраций спирта для различных тарелок была разной, так как точность замера зависела от концентрации и возрастала с увеличением концентрации спирта в паре и жидкости на тарелках.

Эффективность работы тарелок оценивали коэффициентом полезного действия (к.п.д.).

К.п.д. отдельной тарелки определяли с помощью уравнения Мэрфри [3]:

$$\eta_m = \frac{y_n - y_{n-1}}{y_n^* - y_{n-1}}, \quad (2)$$

где: y_n — содержание нижекипящего компонента в парах, поднимающихся с n -й тарелки;

y_{n-1} — содержание нижекипящего компонента в парах, поднимающихся с $n-1$ -й тарелки, расположенной под n -й тарелкой;

y_n^* — содержание нижекипящего компонента в паре, равновесном со стекающей с n -й тарелки флегмой.

Средний к.п.д. тарелок определялся нами как отношение числа ступеней изменения концентрации (теоретических тарелок), которые требовались для перегонки по расчету, к числу действительных тарелок, при помощи которых достигался тот же эффект.

Число ступеней изменения концентрации определяли аналитическим методом. При этом мы пользовались следующим уравнением [3]:

$$X_m = \frac{G}{L} K_{m-1} X_{m-1}, \quad (3)$$

где: X_m — концентрация спирта в жидкости на m -й тарелке в % мол.;
 X_{m-1} — концентрация спирта в жидкости на $m-1$ -й тарелке в % мол.;
 K_{m-1} — коэффициент испарения этилового спирта при концентрации, равной X_{m-1} ;

G — величина парового потока, поднимающегося по колонне, в киломолях;

L — величина жидкостного потока в киломолях.

Выписывая ряд таких уравнений для смежных тарелок, начиная с той, на которой кипящая жидкость содержит около 0,2% об. спирта, мы определяли концентрацию спирта для каждой тарелки, включая и питательную. Из таких вычислений находилось число ступеней изменения концентрации n на участке изменения концентрации от 0,2% об. до концентрации спирта на питательной тарелке. Затем для этого участка изменения концентрации определялся средний к.п.д. тарелки.

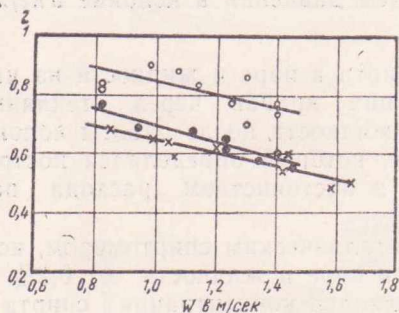


Рис. 5. Зависимость коэффициента полезного действия тарелки от скорости пара в свободном сечении колонны. Типы тарелок $\circ$ — с круглыми клапанами, $\bullet$ — с круглыми клапанами с трапециевидными зубьями, $\times$ — с пластинчатыми клапанами.

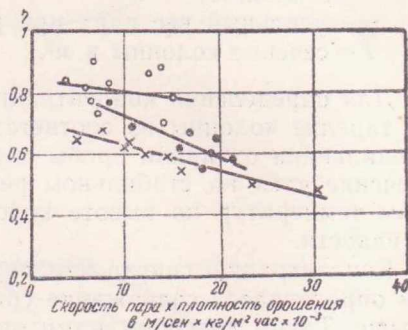


Рис. 6. Изменение коэффициента полезного действия тарелки в зависимости от нагрузки колонны. Условные обозначения типов тарелок те же, что и на рис. 5.

Для определения содержания нижекипящего компонента в паре, равновесном со стекающей жидкостью, мы пользовались кривой равновесия, предложенной В. Н. Стабниковым и О. Г. Муравской [4].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты опытов частично сведены в таблицу.

Основным фактором, определяющим производительность аппарата, является скорость паров в свободном сечении колонны. С одной стороны, увеличение скорости паров приводит к значительному возрастанию уноса и к уменьшению времени контакта жидкости и пара, что должно привести к понижению эффективности тарелки. С другой стороны, увеличение скорости пара ведет к повышению турбулизации

Результаты исследований эффективности клапанных тарелок

Номер опыта	Скорость пара в свободном сечении колонны в м/сек	Плотность орошения в кг/м ² ·час	Содержание спирта в исходной смеси в % вес.	Спиртосъем с единицы объема колонны в кг/м ³ ·час	Расход греющего пара на 1 дж безводного спирта в кг	Концентрация спирта в жидкости на питательной тарелке в % вес.	Средний к.п.д. тарелки
-------------	---	---	---	--	---	--	------------------------

Круглые клапаны с трапецевидными зубьями, живое сечение тарелки 10%

1	0,82	10200	9,48	128	14,7	11,5	0,77
2	0,94	11400	7,2	134	19,7	7,5	0,69
3	1,12	15000	11,84	256	11,2	12,5	0,67
4	1,23	15900	6,9	190	18,3	8,5	0,65
5	1,23	12800	19,3	400	8,9	19,5	0,62
6	1,34	16000	9,9	253	14,8	11,0	0,58
7	1,4	13600	6,6	146	27	7,5	0,60
8	1,45	12500	22	438	9,6	24,0	0,55

Круглые клапаны с ровными краями, живое сечение тарелки 7%

9	0,82	4730	8,42	65	37,3	9,0	0,84
10	0,82	7050	18,05	206	11,1	19,0	0,82
11	0,98	6800	8,34	91,5	30,7	9,5	0,9
12	1,07	12700	8,83	165	18,2	10,5	0,88
13	1,14	7450	20,55	234	13,7	21,5	0,83
14	1,25	12000	8,67	168	21,2	10,0	0,78
15	1,3	9770	8,58	136	26,7	10,0	0,86
16	1,3	10700	19,3	312	11,6	20,0	0,7
17	1,4	4460	22,8	168	24,8	27,0	0,77
18	1,4	5020	21,8	178	23,1	25,0	0,73

Пластинчатые L-образные клапаны, живое сечение тарелки 12,6%

19	0,85	8850	8,91	128	18,6	9,0	0,68
20	0,99	4830	8,91	69,4	40	8,91	0,65
21	1,04	9950	25,3	366	8,05	25,3	0,64
22	1,06	13600	8,5	185	16,2	9,0	0,59
23	1,2	8170	15,14	200	16,2	17,0	0,62
24	1,42	11100	25,3	447	8,95	25,3	0,54
25	1,44	8330	24,35	296	13,5	25,0	0,6
26	1,58	19200	9,48	269	16,5	10,0	0,48
27	1,65	14100	17,21	372	12,6	19,0	0,5

жидкости на тарелке и к развитию поверхности соприкосновения фаз, что должно увеличивать эффективность тарелки.

Опыты показали, что при скорости пара в свободном сечении колонны выше 0,8 м/сек, т. е. в зоне равномерной работы клапанных тарелок, с увеличением скорости пара в свободном сечении колонны и нагрузки колонны коэффициент полезного действия (к.п.д.) тарелки незначительно понижается (рис. 5, 6). Разбросанность точек на графиках объясняется, видимо, различным удельным расходом греющего пара на 100 кг водно-спиртовой смеси и различной концентрацией спирта в исходной смеси.

Наибольшую нагрузку колонны выдерживали тарелки с пластинчатыми клапанами, которые не захлебывались при нагрузке до $30 \text{ м/сек} \cdot \text{кг/м}^2 \cdot \text{час} \cdot 10^{-3}$, и несколько меньшую — с круглыми клапанами с трапециевидными зубьями. Тарелки с круглыми клапанами с ровными краями захлебывались при нагрузке более $15 \text{ м/сек} \cdot \text{кг/м}^2 \cdot \text{час} \cdot 10^{-3}$. Вероятно, разность в допускаемых нагрузках тарелок объясняется различным живым сечением тарелок. С увеличением живого сечения тарелки допускаемая нагрузка увеличивалась.

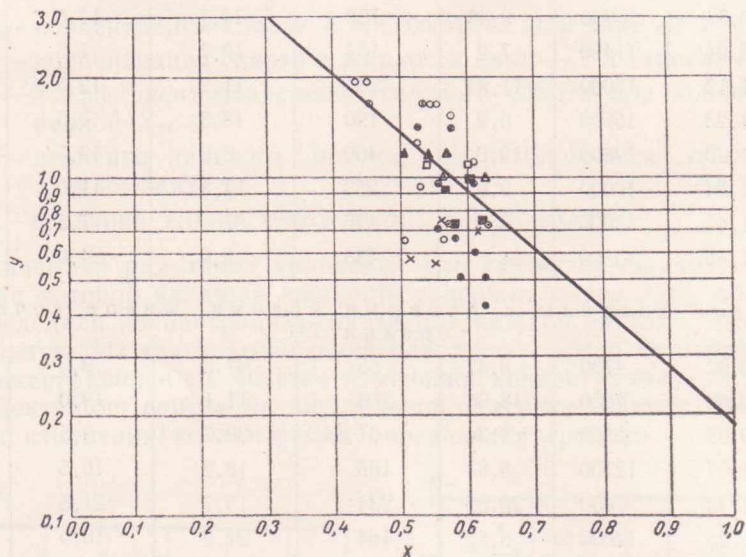


Рис. 7. Зависимость скорости пара и воздуха в колонне от отношения весовых скоростей потоков, их физических свойств и определяющих размеров тарелок.

Типы тарелок при исследовании на системе воздух—вода:

○ — с круглыми клапанами; ⊙ — с круглыми клапанами с трапециевидными зубьями; ■ — с круглыми клапанами с треугольными зубьями; ▲ — с пластинчатыми клапанами при равной длине клапанов; ⊗ — с пластинчатыми клапанами с удлиненными крайними клапанами; △ — колпачковая тарелка; □ — сетчатая тарелка.

Условные обозначения типов тарелок при исследовании на системе пар—водно-спиртовая смесь те же, что на рис. 5.

На основании результатов исследования можно сказать, что клапанные тарелки допускают применение скорости пара до $1,4 \text{ м/сек}$. Для сравнения мы определили по формуле Стабникова [3] допустимую скорость пара в свободном сечении колонны с колпачковыми тарелками при таком же расстоянии между тарелками и высоте сливной перегородки, как и в колонне с клапанными тарелками:

$$w = \frac{0,305 \cdot H}{60 + 0,05 H} - 0,012 Z = \frac{0,305 \cdot 300}{60 + 0,05 \cdot 300} - 0,012 \cdot 40 = 0,74 \text{ м/сек.} \quad (4)$$

Формула (4) выведена на основании результатов исследования колонны с колпачковыми тарелками, поэтому она применима для этого типа тарелок.

Сравнивая вычисленную для колпачковых тарелок скорость пара со скоростью пара, полученной для клапанных тарелок, видим, что допустимая скорость пара в колонне с клапанными тарелками больше, чем в колонне с колпачковыми тарелками.

Для расчета скоростей потоков в колонне с клапанными тарелками мы попытались использовать уравнение, предложенное Касаткиным,

Дытнерским и Умаровым [5]:

$$Y = 10 e^{-4X}, \quad (5)$$

$$Y = \frac{w^3}{g d_s F_c^2} \frac{\gamma_2}{\gamma_{жс}} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_s} \right)^{0,16}, \quad (6)$$

$$X = \left(\frac{L}{G} \right)^{1/4} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_{жс}} \right)^{1/8}, \quad (7)$$

где: w —скорость газа или пара в полном сечении колонны в м/сек;

d_s —эквивалентный диаметр в м;

F_c —свободное сечение тарелки в м²/м²;

γ_2 и $\gamma_{жс}$ —удельные веса газа или пара и жидкости в кг/м³;

μ_s и $\mu_{жс}$ —вязкости воды при 20° и жидкости при данной температуре в сантипуазах;

L и G —весовые скорости жидкости и газа или пара в кг/м²·час;

g —ускорение силы тяжести в м/сек².

Для этого были обработаны и нанесены на график (рис. 7) данные наших лабораторных [1] и заводских исследований для условий оптимальной работы различных типов клапанных тарелок. Тарелки работали в устойчивом режиме, т. е. при полностью открытых клапанах. Лабораторные исследования были проведены на системе воздух — вода, заводские — на системе пар — водно-спиртовая смесь.

Эквивалентный диаметр клапанных тарелок брали равным двойной высоте поднятия клапана.

Опытные данные нанесены соответственно уравнениям (5—7), в полулогарифмических координатах $X—Y$. Из рис. 7 видно, что данные наших опытов приблизительно могут быть выражены этими уравнениями.

Таким образом, нами было подтверждено предположение Касаткина и Дытнерского [6] о том, что уравнение (5) будет справедливо и для определения скоростей газа или пара в колоннах с клапанными тарелками.

Как видно из рис. 7, из заводских опытов больше всего отвечают оптимальному режиму точки, относящиеся к тарелкам с круглыми клапанами. Этим, видимо, объясняется тот факт, что тарелки с круглыми клапанами имели максимальный к.п.д., доходящий до 0,9.

Разница в к.п.д. объясняется также тем, что тарелки имели различный эквивалентный диаметр и различную скорость пара в отверстиях тарелки. С уменьшением d_s и увеличением скорости пара в отверстиях тарелки улучшалось пенообразование, а следовательно, и повышалась эффективность тарелки. При увеличении живого сечения тарелки к.п.д. понижался. При уменьшении живого

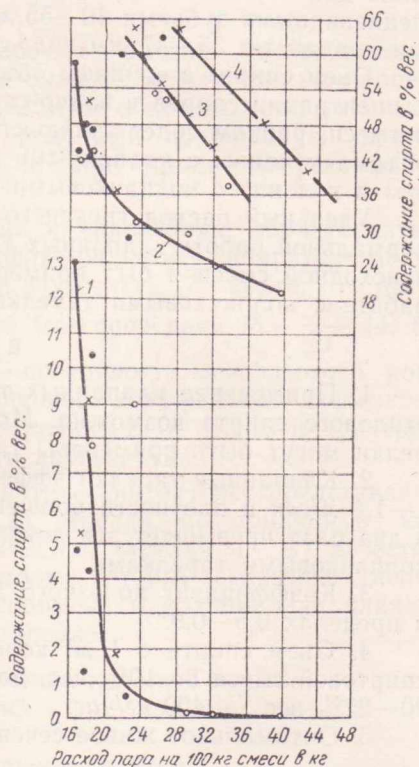


Рис. 8. Изменение содержания спирта в зависимости от удельного расхода пара:

1—в жидкости на третьей тарелке (сверху) при крепости исходной смеси 7—10% вес.; 2—в дистилляте при крепости исходной смеси 7—10% вес.; 3—в дистилляте при крепости исходной смеси 19—22% вес.; 4—в дистилляте при крепости исходной смеси 25—26% вес.