

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

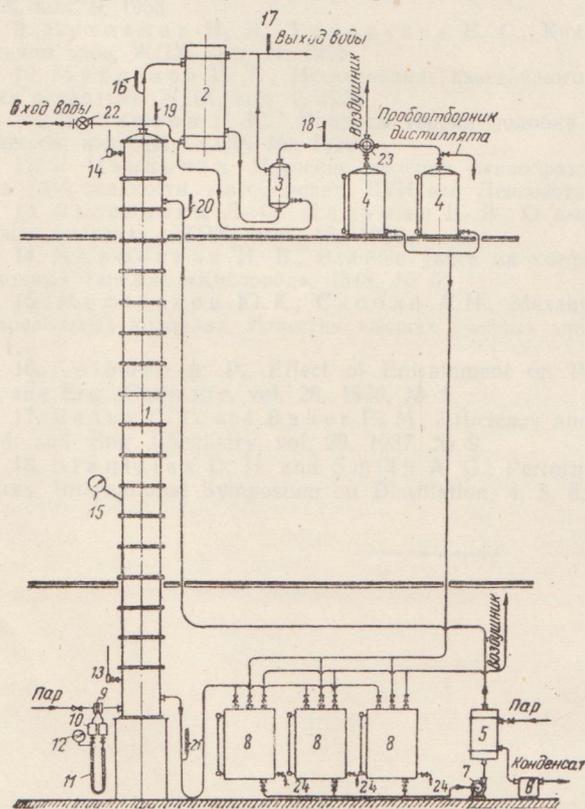


Рис. 1. Схема непрерывно действующей полупроизводственной ректификационной установки:

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

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

бия и моделирования, которые были разработаны Стабниковым [2] применительно к барботажной аппаратуре.

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.

Схема экспериментальной установки для определения эффективности клапанных тарелок показана на рис. 1.

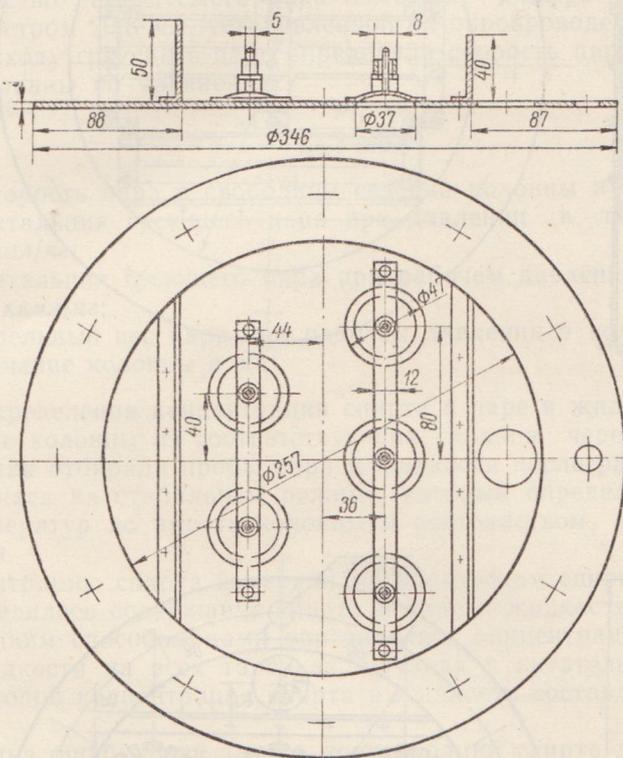


Рис. 2. Тарелка с круглыми клапанами.

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.

Внутренний диаметр колонны 257 мм, расстояние между тарелками

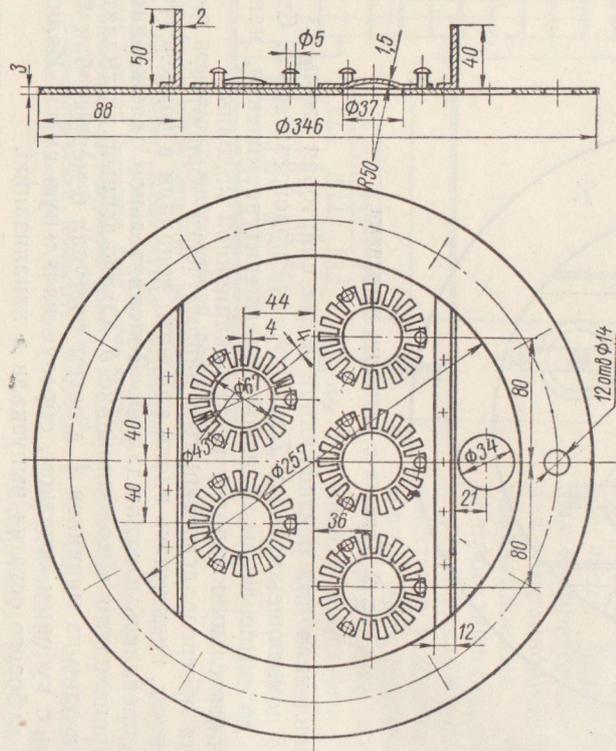


Рис. 3. Тарелка с круглыми клапанами с трапецевидными зубьями.

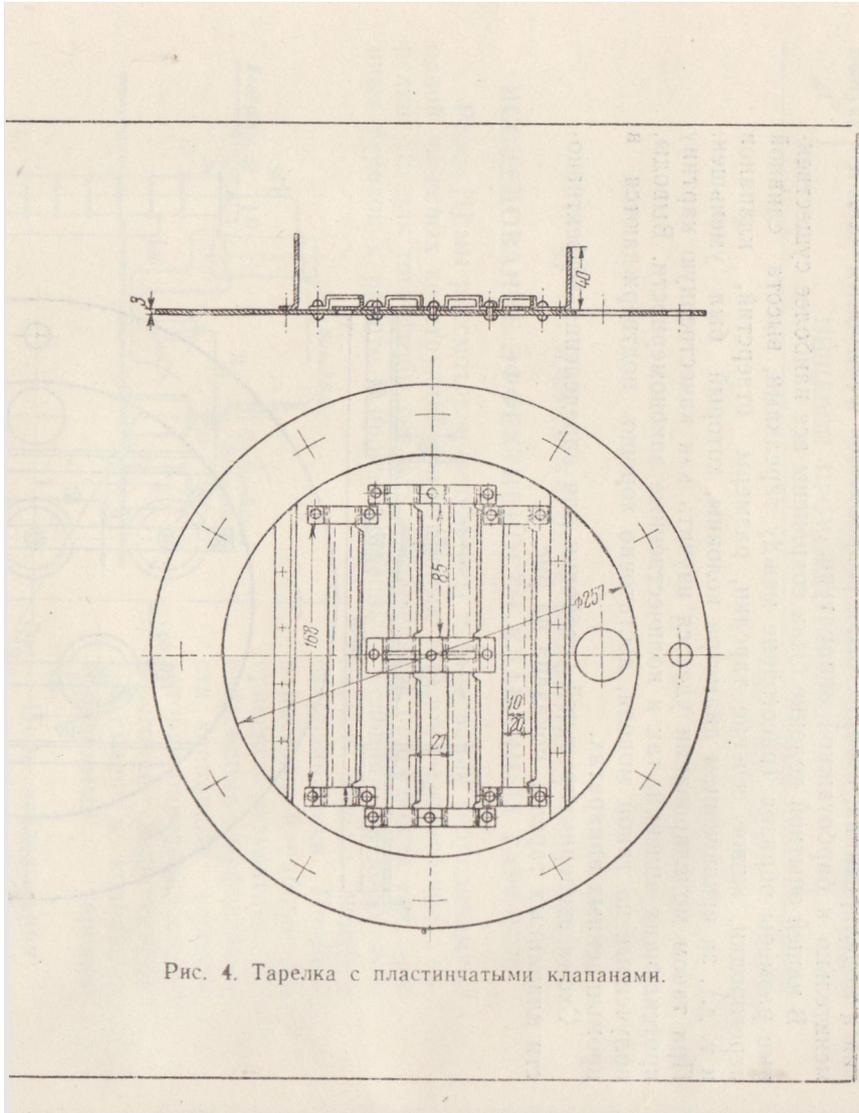


Рис. 4. Тарелка с пластинчатыми клапанами.

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 трапециевидными 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:

$$\omega = \frac{Pi_1}{i_2 \gamma_2 F 3600} \quad (1)$$

где: ω —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 Мэрффи [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.

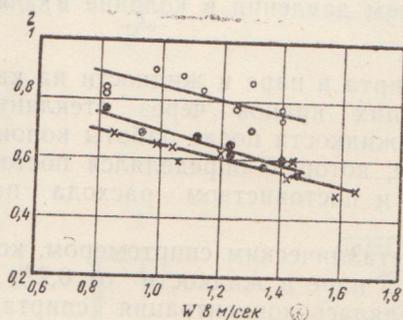


Рис. 5. Зависимость коэффициента полезного действия тарелки от скорости пара в свободном сечении колонны. Типы тарелок о — с круглыми клапанами, ● — с круглыми клапанами с трапециевидными зубьями, x — с пластинчатыми клапанами.



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 джл безводного спирта в кг	Концентрация спирта в жидкости на питательной тарелке в % вес.	Средний к.п.д. тарелки
Круглые клапаны с трапециевидными 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 трапецевидными зубьями. Тарелки с круглыми клапанами с трапецевидными зубьями 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.

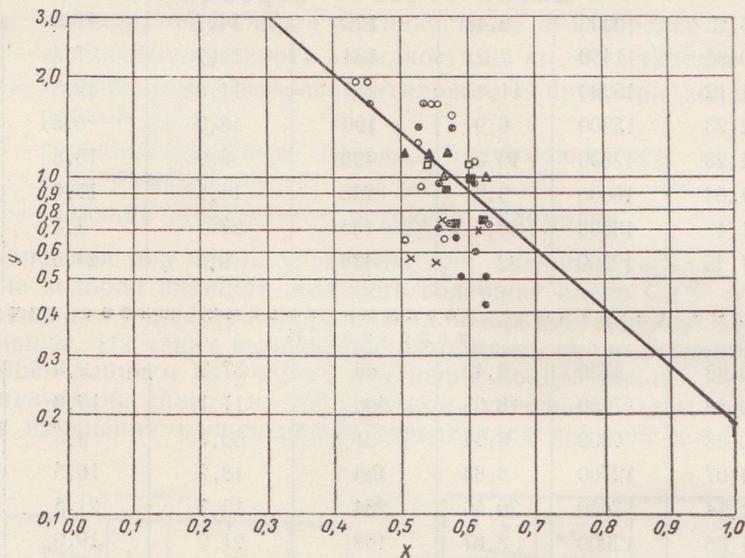


Рис. 7. Зависимость скорости пара и воздуха в колонне от отношения весовых скоростей потоков, их физических свойств и определяющих размеров тарелок.

Типы тарелок при исследовании на системе воздух—вода:

○ — с круглыми клапанами; ⊙ — с круглыми клапанами с трапецевидными 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:

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

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]:

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

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

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

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;
 $\mu_в$ 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

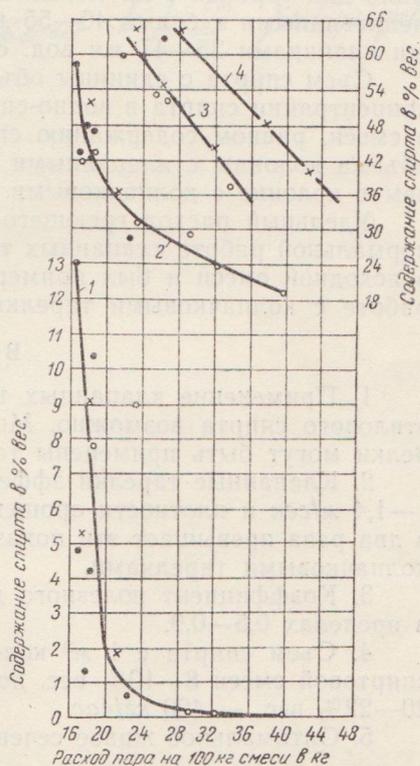


Рис. 8. Изменение содержания спирта в зависимости от удельного расхода пара:

1—в жидкости на третьей тарелке (сверху) или 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.

сечения тарелки увеличивался перепад давления на тарелках, что приводило к более раннему захлебыванию колонны. Поэтому оптимальным живым сечением тарелки можно считать 10% от площади тарелки.

На рис. 8 показано изменение содержания спирта в пробах жидкости на третьей тарелке (считая сверху) и в дистилляте в зависимости от удельного расхода пара. Из рисунка 8 видно, что незначительное увеличение расхода пара вызывает резкое снижение содержания спирта в жидкости на тарелках, а следовательно, и уменьшение количества истощающих тарелок в колонне.

Во время опытов клапанные тарелки хорошо работали при плотности орошения, примерно в два раза превышающей плотность орошения, проектируемую Гипроспиртом в существующих брагоректификационных аппаратах с колпачковыми тарелками. Так, для бражной колонны брагоректификационного аппарата № 0 предусматривается плотность орошения $8400 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}$. Для альдегидной и ректификационной колонн она будет значительно меньше. В наших же опытах плотность орошения достигала $16\,000\text{--}19\,000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}$.

Сопротивление одной клапанной тарелки во время опытов составляло для тарелок с круглыми клапанами с ровными краями и с трапециевидными зубьями $40\text{--}55 \text{ мм вод. ст.}$, для тарелок с пластинчатыми клапанами $35\text{--}47 \text{ мм вод. ст.}$

Съем спирта с единицы объема колонны повышался с увеличением концентрации спирта в водно-спиртовой смеси. При содержании спирта в смеси, равном содержанию спирта в бражке, спиртосъем с единицы объема колонны с клапанными тарелками примерно в два раза выше, чем в колонне с колпачковыми тарелками.

Удельный расход греющего пара на 1 *дкл* безводного спирта при нормальной работе клапанных тарелок зависел от концентрации спирта в исходной смеси и был примерно равен удельному расходу пара при работе с колпачковыми тарелками.

ВЫВОДЫ

1. Применение клапанных тарелок для эспюрации и ректификации этилового спирта возможно. Можно предположить, что клапанные тарелки могут быть применены также для перегонки паточной бражки.

2. Клапанные тарелки эффективно работают при скорости пара $1\text{--}1,4 \text{ м/сек}$ и плотности орошения до $16\,000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}$, что примерно в два раза превышает эти показатели в существующих колоннах с колпачковыми тарелками.

3. Коэффициент полезного действия клапанных тарелок изменялся в пределах $0,5\text{--}0,9$.

4. Съем спирта с 1 м^3 колонны при крепости исходной водно-спиртовой смеси $8\text{--}10\%$ вес. достигал 250 кг/час , при крепости смеси $20\text{--}22\%$ вес. — 400 кг/час .

5. Оптимальное живое сечение клапанных тарелок составляет 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малезик И. Ф., Стабников В. Н., Исследование гидродинамики клапанных тарелок, Труды КТИППа, вып. 22, 1960
2. Стабников В. Н., Исследование работы ректификационных аппаратов с колпачковыми тарелками, «Химическое машиностроение», 1937, № 2.
3. Стабников В. Н., Харин С. Е., Теоретические основы перегонки и ректификации спирта, Пищепромиздат, 1951.
4. Стабников В. Н., Муравская О. Г., Фазовое равновесие в системе этиловый спирт—вода при атмосферном давлении, Труды КТИППа, вып. 13, 1953.
5. Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И., Умаров С. У., К расчету колонн с провальными тарелками, «Химическая промышленность», 1958, № 3.
6. Касаткин А. Г., Дытнерский Ю. И., К расчету скоростей потоков в тарельчатых колоннах, «Химическая промышленность», 1960, № 1.