

Лабораторная работа № 2

1) Исходные экспериментальные данные

В исходную таблицу заносим только экспериментально полученные величины без расчётных столбцов:

№	$\Delta P_{эс}$, Па	ΔP , Па	$\Delta P_{эор}$, Па	ΔP , Па	L, л/ч
1	161	18	277	18	130
2	187	80	548	20	130
3	204	147	737	44	130
4	228	221	729	121	130
5	248	309	676	210	130
6	287	408	665	308	130
7	326	623	724	320	130
8	365	649	712	552	130
9	744	664	862	664	130
10	790	822	927	822	130
11	857	963	993	963	130
12	882	1118	1059	1118	130

Примечание: для строк 9–12 значения $\Delta P_{эор}$ использованы из предварительно восстановленного ряда, так как в исходной фотографии эти точки были дописаны не полностью.

2) Расчёт объёмного расхода воздуха для сухой колонны

Используем формулу:

$$V = 2\sqrt{\Delta P}.$$

$$V_1 = 2\sqrt{\Delta P_1} = 2\sqrt{18} = 8,485 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_2 = 2\sqrt{\Delta P_2} = 2\sqrt{80} = 17,889 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_3 = 2\sqrt{\Delta P_3} = 2\sqrt{147} = 24,249 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_4 = 2\sqrt{\Delta P_4} = 2\sqrt{221} = 29,732 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_5 = 2\sqrt{\Delta P_5} = 2\sqrt{309} = 35,157 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_6 = 2\sqrt{\Delta P_6} = 2\sqrt{408} = 40,398 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_7 = 2\sqrt{\Delta P_7} = 2\sqrt{623} = 49,920 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_8 = 2\sqrt{\Delta P_8} = 2\sqrt{649} = 50,951 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_9 = 2\sqrt{\Delta P_9} = 2\sqrt{664} = 51,536 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_{10} = 2\sqrt{\Delta P_{10}} = 2\sqrt{822} = 57,341 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_{11} = 2\sqrt{\Delta P_{11}} = 2\sqrt{963} = 62,064 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_{12} = 2\sqrt{\Delta P_{12}} = 2\sqrt{1118} = 66,873 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

3) Расчёт объёмного расхода воздуха для орошаемой колонны

$$V = 2\sqrt{\Delta P}.$$

$$V_1 = 2\sqrt{\Delta P_1} = 2\sqrt{18} = 8,485 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_2 = 2\sqrt{\Delta P_2} = 2\sqrt{20} = 8,944 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_3 = 2\sqrt{\Delta P_3} = 2\sqrt{44} = 13,266 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_4 = 2\sqrt{\Delta P_4} = 2\sqrt{121} = 22,000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_5 = 2\sqrt{\Delta P_5} = 2\sqrt{210} = 28,983 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_6 = 2\sqrt{\Delta P_6} = 2\sqrt{308} = 35,100 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_7 = 2\sqrt{\Delta P_7} = 2\sqrt{320} = 35,777 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_8 = 2\sqrt{\Delta P_8} = 2\sqrt{552} = 46,989 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_9 = 2\sqrt{\Delta P_9} = 2\sqrt{664} = 51,536 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_{10} = 2\sqrt{\Delta P_{10}} = 2\sqrt{822} = 57,341 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_{11} = 2\sqrt{\Delta P_{11}} = 2\sqrt{963} = 62,064 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$V_{12} = 2\sqrt{\Delta P_{12}} = 2\sqrt{1118} = 66,873 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

4) Расчёт скорости воздуха, отнесённой к полному сечению колонны, для сухой колонны

Используем формулу:

$$\omega_k = \frac{4V}{\pi D_k^2 \cdot 3600}.$$

$$\omega_{k_1} = \frac{4 \cdot V_1}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 8,485}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,075 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_2} = \frac{4 \cdot V_2}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 17,889}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,158 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_3} = \frac{4 \cdot V_3}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 24,249}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,214 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_4} = \frac{4 \cdot V_4}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 29,732}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,263 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_5} = \frac{4 \cdot V_5}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 35,157}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,311 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_6} = \frac{4 \cdot V_6}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 40,398}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,357 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_7} = \frac{4 \cdot V_7}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 49,920}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,441 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_8} = \frac{4 \cdot V_8}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 50,951}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,451 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_9} = \frac{4 \cdot V_9}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 51,536}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,456 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_{10}} = \frac{4 \cdot V_{10}}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 57,341}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,507 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_{11}} = \frac{4 \cdot V_{11}}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 62,064}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,549 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_{12}} = \frac{4 \cdot V_{12}}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 66,873}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,591 \text{ м/с.}$$

5) Расчёт скорости воздуха, отнесённой к полному сечению колонны, для орошаемой колонны

$$\omega_k = \frac{4V}{\pi D_k^2 \cdot 3600}.$$

$$\omega_{k_1} = \frac{4 \cdot V_1}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 8,485}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,075 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_2} = \frac{4 \cdot V_2}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 8,944}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,079 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_3} = \frac{4 \cdot V_3}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 13,266}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,117 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_4} = \frac{4 \cdot V_4}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 22,000}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,195 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_5} = \frac{4 \cdot V_5}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 28,983}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,256 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_6} = \frac{4 \cdot V_6}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 35,100}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,310 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_7} = \frac{4 \cdot V_7}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 35,777}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,316 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_8} = \frac{4 \cdot V_8}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 46,989}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,415 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_9} = \frac{4 \cdot V_9}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 51,536}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,456 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_{10}} = \frac{4 \cdot V_{10}}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 57,341}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,507 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_{11}} = \frac{4 \cdot V_{11}}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 62,064}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,549 \text{ м/с.}$$

$$\omega_{k_{12}} = \frac{4 \cdot V_{12}}{\pi D_k^2 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 66,873}{3,1416 \cdot 0,2^2 \cdot 3600} = 0,591 \text{ м/с.}$$

6) Заполнение таблицы 2.1

После расчёта объёмных расходов и скоростей получаем полную таблицу результатов эксперимента:

№	$\Delta P_{эс},$ Па	$\Delta P,$ Па	$V,$ м³/ч	$\omega_k,$ м/с	$\Delta P_{эор},$ Па	$\Delta P,$ Па	$L,$ л/ч	$V,$ м³/ч	$\omega_k,$ м/с
1	161	18	8,485	0,075	277	18	130	8,485	0,075
2	187	80	17,889	0,158	548	20	130	8,944	0,079
3	204	147	24,249	0,214	737	44	130	13,266	0,117
4	228	221	29,732	0,263	729	121	130	22,000	0,195
5	248	309	35,157	0,311	676	210	130	28,983	0,256
6	287	408	40,398	0,357	665	308	130	35,100	0,310
7	326	623	49,920	0,441	724	320	130	35,777	0,316
8	365	649	50,951	0,451	712	552	130	46,989	0,415
9	744	664	51,536	0,456	862	664	130	51,536	0,456
10	790	822	57,341	0,507	927	822	130	57,341	0,507
11	857	963	62,064	0,549	993	963	130	62,064	0,549
12	882	1118	66,873	0,591	1059	1118	130	66,873	0,591

7) Определение коэффициента сопротивления колпачковой тарелки

Для дальнейших расчётов берём три характерные точки сухой колонны: опыты № 6, 7 и 8.

Используем соотношения:

$$V_c = F_k \cdot \omega_k = f_{ш} \cdot n_{ш} \cdot \omega_{ш}$$

$$\Delta P_c = \xi \cdot \frac{\omega_{ш}^2}{2} \cdot \rho_G$$

Отсюда:

$$\xi = \frac{2\Delta P_c}{\rho_G \omega_{ш}^2}$$

$$\omega_{ш,6} = \frac{F_k \cdot \omega_{k,6}}{n_{ш} \cdot f_{ш}} = \frac{0,03142 \cdot 0,357}{150 \cdot 0,000024} = 3,117 \text{ м/с.}$$

$$\Delta P_{эс,6}^{(1)} = \frac{\Delta P_{эс,6}}{2} = \frac{287}{2} = 143,5 \text{ Па.}$$

$$\xi_6 = \frac{2\Delta P_{эс,6}^{(1)}}{\rho_G \omega_{ш,6}^2} = \frac{2 \cdot 143,5}{1,2 \cdot 3,117^2} = 24,61.$$

$$\omega_{ш,7} = \frac{F_k \cdot \omega_{k,7}}{n_{ш} \cdot f_{ш}} = \frac{0,03142 \cdot 0,441}{150 \cdot 0,000024} = 3,852 \text{ м/с.}$$

$$\Delta P_{\text{эс},7}^{(1)} = \frac{\Delta P_{\text{эс},7}}{2} = \frac{326}{2} = 163,0 \text{ Па.}$$

$$\xi_7 = \frac{2\Delta P_{\text{эс},7}^{(1)}}{\rho_G \omega_{\text{ш},7}^2} = \frac{2 \cdot 163,0}{1,2 \cdot 3,852^2} = 18,31.$$

$$\omega_{\text{ш},8} = \frac{F_k \cdot \omega_{k,8}}{n_{\text{ш}} \cdot f_{\text{ш}}} = \frac{0,03142 \cdot 0,451}{150 \cdot 0,000024} = 3,931 \text{ м/с.}$$

$$\Delta P_{\text{эс},8}^{(1)} = \frac{\Delta P_{\text{эс},8}}{2} = \frac{365}{2} = 182,5 \text{ Па.}$$

$$\xi_8 = \frac{2\Delta P_{\text{эс},8}^{(1)}}{\rho_G \omega_{\text{ш},8}^2} = \frac{2 \cdot 182,5}{1,2 \cdot 3,931^2} = 19,68.$$

Среднее значение коэффициента сопротивления:

$$\xi_{\text{ср}} = \frac{24,61 + 18,31 + 19,68}{3} = 20,87.$$

8) Расчёт полного сопротивления орошаемой тарелки

Полное сопротивление одной тарелки определяется формулой:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{сл}}.$$

Дополнительно используем:

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4\sigma}{d_{\text{эш}}}, \quad d_{\text{эш}} = \frac{2b_{\text{ш}}h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}} + h_{\text{ш}}}.$$

$$\Delta P_{\text{сл}} = 1,3 \cdot \left[k \cdot \left(h_{\text{п}} - \frac{h_{\text{ш}}}{2} \right) + \Delta \cdot \sqrt[3]{k} \right] \rho_L g.$$

$$\Delta = \sqrt[3]{\left(\frac{L}{m \cdot b_{\text{п}}} \right)^2}.$$

Для сопоставления выбрана точка № 8, так как это последняя исходная измеренная точка до оценочного продолжения ряда.

$$\omega_{\text{ш}}^* = \frac{F_k \cdot \omega_k^*}{n_{\text{ш}} \cdot f_{\text{ш}}} = \frac{0,03142 \cdot 0,415}{150 \cdot 0,000024} = 3,626 \text{ м/с.}$$

$$\Delta P_c = \xi_{\text{ср}} \cdot \frac{(\omega_{\text{ш}}^*)^2}{2} \cdot \rho_G = 20,87 \cdot \frac{3,626^2}{2} \cdot 1,2 = 164,6 \text{ Па.}$$

$$d_{\text{эщ}} = \frac{2b_{\text{ш}}h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}} + h_{\text{ш}}} = \frac{2 \cdot 0,003 \cdot 0,008}{0,003 + 0,008} = 0,00436 \text{ м.}$$

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4\sigma}{d_{\text{эщ}}} = \frac{4 \cdot 0,072}{0,00436} = 66,0 \text{ Па.}$$

$$\Delta = \sqrt[3]{\left(\frac{L}{m \cdot b_{\text{п}}}\right)^2} = \sqrt[3]{\left(\frac{0,13}{6400 \cdot 0,10}\right)^2} = 0,00346 \text{ м.}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{сл}} &= 1,3 \cdot \left[k \cdot \left(h_{\text{п}} - \frac{h_{\text{ш}}}{2} \right) + \Delta \cdot \sqrt[3]{k} \right] \rho_L g \\ &= 1,3 \cdot \left[0,35 \cdot \left(0,015 - \frac{0,008}{2} \right) + 0,00346 \cdot \sqrt[3]{0,35} \right] \cdot 1000 \cdot 9,81 \\ &= 80,2 \text{ Па.} \end{aligned}$$

$$\Delta P_{\text{пор}}^{(1)} = \Delta P_{\text{с}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{сл}} = 164,6 + 66,0 + 80,2 = 310,8 \text{ Па.}$$

$$\Delta P_{\text{пор}} = 2 \cdot \Delta P_{\text{пор}}^{(1)} = 2 \cdot 310,8 = 621,5 \text{ Па.}$$

$$\Delta = \frac{|\Delta P_{\text{пор}} - \Delta P_{\text{эор}}|}{\Delta P_{\text{эор}}} \cdot 100\% = \frac{|621,5 - 712,0|}{712,0} \cdot 100\% = 12,71\%.$$

9) Заполнение таблицы 2.2

№	ωк, м/с	ωш, м/с	ξ	ξср	ω*к, м/с	ωш, м/с	ΔPпор , Па	ΔPэор , Па	Δ, %
6	0,357	3,117	24,61	20,87	—	—	—	—	—
7	0,441	3,852	18,31	20,87	—	—	—	—	—
8	0,451	3,931	19,68	20,87	0,415	3,626	621,5	712,0	12,71

10) Графики

При построении графиков экспериментальные перепады давления были разделены на 2, так как в колонне находятся две одинаковые тарелки, а графики строятся для одной тарелки.

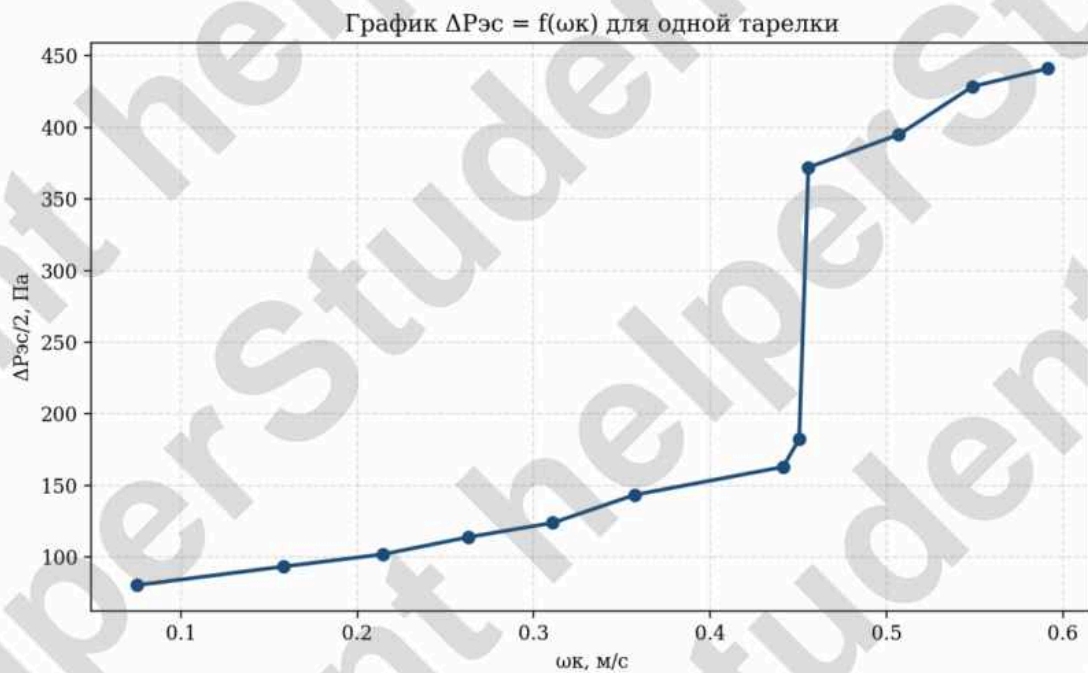


График сухой тарелки

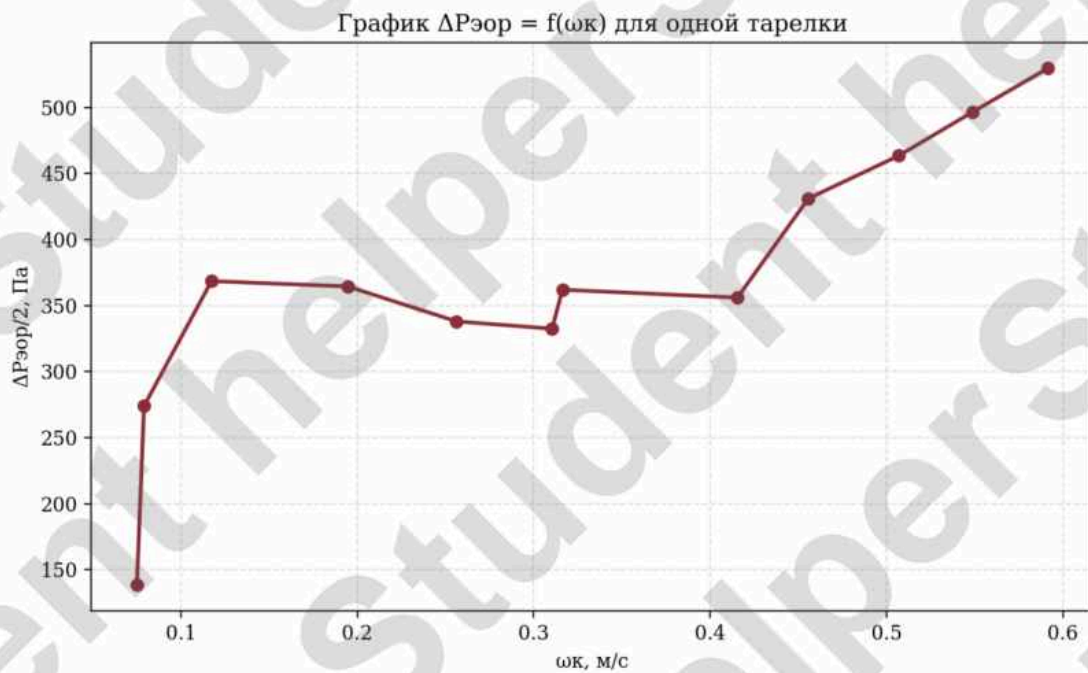


График орошаемой тарелки

11) Выводы

1. По исходным экспериментальным данным были рассчитаны объёмные расходы воздуха и скорости газа для сухой и орошаемой колонн по всем опытам.

2. После детального расчёта по трём выбранным точкам получено среднее значение коэффициента сопротивления колпачковой тарелки $\xi_{\text{ср}} = 20,87$.
3. Для выбранной точки № 8 расчётное полное сопротивление орошаемой колонны составило 621,5 Па, а экспериментальное значение равно 712,0 Па.
4. Расхождение между расчётным и экспериментальными значениями составило 12,71 %, что можно считать допустимым для учебного расчёта.

12) Ответы на контрольные вопросы

1. Цель лабораторной работы состоит в изучении гидродинамических явлений в тарельчатой колонне и определении зависимости гидравлического сопротивления тарелки от скорости газа.
2. Наиболее распространены колпачковые, ситчатые и клапанные тарелки; тарельчатые колонны применяют в процессах абсорбции и ректификации.
3. Тарелка с организованным переливом состоит из приёмного кармана, рабочей части и переливного устройства; эти элементы обеспечивают поступление жидкости, контакт фаз и перелив жидкости на нижележащую тарелку.
4. При увеличении расхода газа последовательно наблюдаются неравномерная работа колпачков, устойчивый барботажный режим, чрезмерный унос жидкости и захлёбывание.
5. Сопротивление сухой тарелки зависит от скорости газа, плотности газа, геометрии прорезей и коэффициента сопротивления ξ .
6. Сопротивление орошаемой тарелки определяется сопротивлением сухой тарелки, поверхностным натяжением, высотой жидкого слоя, расходом жидкости и конструктивными размерами тарелки.
7. Устойчивую работу тарелки определяют равномерный барботаж, отсутствие чрезмерного уноса, отсутствие захлёбывания и достаточная высота жидкого слоя на тарелке.