

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТАРЕЛЬЧАТЫХ И НАСАДОЧНЫХ КОЛОНН

6.1. Определение размеров ректификационных колонн

Основными конструктивными размерами колонны являются ее диаметр и высота. Диаметр ректификационного аппарата зависит главным образом от принятых скоростей движения пара и жидкости и отношения площади свободного сечения к площади полного.

В тарельчатой колонне минимальная скорость паров определяется из условия обеспечения барботажа через все рабочее сечение тарелки. Максимальная скорость не должна превышать критической, при которой начинается чрезмерный унос жидкости на вышележащую тарелку.

При выбранном расстоянии между тарелками H_T для воздухо-разделительных колонн критическую скорость определяют по эмпирической зависимости [59]

$$w_{кр} = 0,05 \left(5H_T \frac{\rho_{ж}}{\rho_n} \right)^{0,5}. \quad (6.1)$$

При выбранной рабочей скорости w величину H_T определяют из условия предупреждения захлебывания $H_T \geq H_n$ или ограничения уноса $H_T > H_n + H_c$. Здесь H_n — расстояние между тарелками, определяемое из условия работы переливных устройств; $H_n = \frac{\Delta p_{ст}}{g \rho_{ж}}$ — высота слоя пены на тарелке (см. § 6.2); H_c — высота сепарационного пространства.

Высоту сепарационного пространства определяют в соответствии с формулой

$$e = 7,7 \cdot 10^{-5} \left(\frac{73}{\sigma} \right) \left(\frac{w}{H_c} \right)^{3,2}, \quad (6.2)$$

задаваясь допустимым по технологическим условиям относительным уносом $\epsilon < 0,05 \div 0,1$. Здесь σ — поверхностное натяжение, МН/м.

Расстояние между тарелками зависит также от их конструкции и наличия или отсутствия сепаратора фаз. Обычно $H_T = 80 \div 160$ мм при скоростях движения пара по колонне $0,2 \div 0,6$ м/с.

Диаметр колонны определяют исходя из конструкций ректификационных тарелок. Так, например, для кольцевых тарелок с диаметром вытеснителя D_n диаметр колонны D_k определяется равенством

$$D_k^2 - D_n^2 = 4 \frac{V}{\pi \omega}, \quad (6.3)$$

где V — объемный расход пара по колонне.

Высота колонны будет

$$H_k = \sum_{i=1}^m (n_d H_T)_i + \sum_{j=1}^l H_j, \quad (6.4)$$

где m — число секций колонны; n_d — число действительных тарелок; H_j — высота испарителя, сепарационного пространства на выходе из колонны, дополнительных участков для промежуточных вводов и выводов потоков и т. п.

В насадочных колоннах минимальная скорость определяется из условия равномерного распределения пара по сечению аппарата. Максимальная скорость пара не должна превышать предельной скорости противоточного движения фаз. Предельная скорость (скорость захлебывания) определяется по формулам, приведенным в § 6.3. Режим работы колонны, соответствующий максимальному съему продукции с единицы объема аппарата, отвечает нагрузкам по газу, располагающимся вблизи точки захлебывания.

Диаметр насадочной колонны определяется по принятой скорости пара. Методика определения высоты насадочной части аппарата подробно изложена в главе 5.

6.2. Гидравлические сопротивления ректификационных тарелок

Независимо от конструкции элементов барботажной тарелки гидравлическое сопротивление потоку пара может быть определено выражением

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_\sigma + \Delta p_{ст}, \quad (6.5)$$

где Δp_c — сопротивление сухой тарелки; Δp_σ — перепад давления, необходимый для преодоления поверхностного натяжения; $\Delta p_{ст}$ — перепад давления, необходимый для уравновешивания слоя жидкости на тарелке.

Сопротивление сухой ситчатой тарелки без учета толщины решетки определяют по формуле

$$\Delta p_c = \xi \frac{\rho \omega_0^2}{2}, \quad (6.6)$$

где ω_0 — скорость пара в отверстии. Коэффициент сопротивления ξ практически не зависит от размеров и формы отверстий. Для тарелок воздухоразделительных колонн с долей живого сечения 12 % $\xi \approx 1,83$ [59].

При расчете по формуле (6.6) сопротивления сухой кольцевой тарелки используется скорость пара в прорезях кольца, а коэффициент сопротивления равен сумме коэффициентов сопротивления элементов кольца. Для наиболее распространенных конструкций кольцевых $\xi = 4 \div 5$ [59].

У ситчатых и кольцевых колонн в момент отрыва парового пузыря в жидкости

$$\Delta p_\sigma = 4\sigma/d_0. \quad (6.7)$$

Для ситчатых тарелок d_0 — диаметр отверстия; для кольцевых $d_0 = 4F_{пр}/u$, где $F_{пр}$ — площадь свободного сечения прорези; u — периметр прорези.

Выражение (6.7) применимо для отверстий с $d_0 < 1$ мм. При большем диаметре отверстий величину Δp_σ следует вычислять по формуле [28]

$$\Delta p_\sigma = \frac{4\sigma}{1,3d_0 + 0,08d_0^2}. \quad (6.8)$$

Составляющая $\Delta p_{ст}$ у ситчатой тарелки определяется как

$$\Delta p_{ст} = H_{ст} \rho_{ж} g. \quad (6.9)$$

Наиболее полное уравнение для расчета высоты статического слоя жидкости $H_{ст}$ на барботажных тарелках [69] имеет вид

$$H_{ст} = H_n k_1 + \sqrt[3]{(L/M)^2 k_2}, \quad (6.10)$$

где H_n — высота сливной перегородки; k_1, k_2 — относительная плотность пены ниже и выше уровня сливной перегородки соответственно; L — интенсивность жидкостного потока, $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч})$; M — коэффициент расхода через сливную перегородку, $\text{м}^{0,5}/\text{ч}$.

Для расчета величин, входящих в выражение (6.10), используются зависимости

$$k_1 = k H_n^{-0,5} (l_p + 0,38); \quad k_2 = k^{0,75} \cdot 0,35 H_n^{-0,15};$$

$$M = 810 L^{-0,17} \mu^{-0,1} \sigma^{-0,08} \quad \text{при} \quad 5 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч}) \leq L \leq 10 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч});$$

$$M = 2200 \mu_{эф}^{-0,1} \sigma^{-0,08} \quad \text{при} \quad L > 10 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч}),$$

где $\mu_{эф}$ — эффективная вязкость двухфазного динамического

слоя, $\mu_{\text{ф}} = \mu_{\text{ж}} k$; k — средняя относительная плотность пены на тарелках, $k = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{ж}}$; l_y — длина успокоительной зоны на тарелке у сливной перегородки. Здесь единица коэффициента поверхностного натяжения σ — дин/см, динамической вязкости μ — сантипуаз.

Относительная плотность пены на ситчатых тарелках мало изменяется, вследствие чего в расчетах обычно принимают $k = 0,15$. При использовании уравнения (6.9) для определения $\Delta p_{\text{ст}}$ на колпачковых тарелках величину H_0 следует определять как разность высоты сливного порога и половины высоты прорези колпачка над тарелкой. Для тарелок различных типов $k = 0,3 \div 0,7$.

6.3. Предельные нагрузки и гидравлические сопротивления пленочных и насадочных колонн

Гидравлические характеристики пленочных и насадочных аппаратов в значительной мере определяются режимами течения потоков пара и жидкости.

Предельные нагрузки по газу и жидкости в противоточных аппаратах лимитируются началом явления захлебывания, заключающегося в потере устойчивости противоточного течения фаз и вследствие этого в резком повышении гидравлического сопротивления.

Уравнение для критической скорости движения газа при волновом течении тонкого слоя жидкости получено П. Л. Капицей:

$$\omega_{\text{н}}^{\text{кр}} = \psi^{0,5} \sqrt[3]{\frac{v_{\text{ж}} g^{0,5}}{l_y^2}} 3,5 \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}} + \omega_{\text{ф}}, \quad (6.11)$$

где ψ — поправочный коэффициент, $\omega_{\text{ф}}$ — фазовая скорость движения волн.

При $\psi = 1$ и $\omega_{\text{ф}} = 0$ уравнением (6.11) достаточно точно описываются экспериментальные данные, полученные при ректификации жидкого воздуха в трубчатой колонне.

Явление захлебывания в общем случае определяется взаимодействием сил трения, инерции, тяжести и поверхностного натяжения, а также геометрическими характеристиками аппаратов. Пренебрежение этими факторами привело к уравнениям, описывающим опытные данные в сравнительно узких пределах независимых переменных. К ним относится, например, используемая для расчета предельных нагрузок насадочных аппаратов зависимость Бейна и Хоугена.

Уравнение, применимое в широком диапазоне физических свойств взаимодействующих фаз и геометрических характеристик контактных устройств, имеет вид

$$K = 1,13 \text{Fr}^{0,2} \text{We}^{-0,31} \text{Ga}^{-0,09}, \quad (6.12)$$

где

$$K' \text{ — число Кутателадзе, } K = \frac{\omega_{\text{н}}^{\text{кр}} \rho_{\text{ж}}^{0,5}}{\sigma^{0,25} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})^{0,25} g^{0,25}};$$

$$\text{Fr} \text{ — число Фруда, } \text{Fr} = \frac{V (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})^{0,75} g^{0,25}}{\sigma^{0,75}};$$

$$\text{Ga} \text{ — число Галвля, } \text{Ga} = \frac{\sigma^{1,5}}{v_{\text{ж}} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})^{1,5} g^{0,5}};$$

$$\text{We} \text{ — число Вебера, } \text{We} = \frac{\sigma}{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) g d_p^2}.$$

Уравнение (6.12) справедливо как для насадочных, так и пленочных ректификационных колонн.

Общее падение давления на участке между входом и любым сечением с координатой x в неорошаемых пленочных колоннах можно представить как сумму падений давления, вызванных сопротивлением стабилизированного течения и изменением сечения потока,

$$\Delta p = \left[\lambda \frac{x}{d_s} + K(x) \right] \frac{\rho \omega^2}{2}, \quad (6.13)$$

где $K(x)$ — инкремент падения давления, учитывающий гидродинамическую нестабильность течения.

При ламинарном газовом потоке

$$\lambda = C / \text{Re}. \quad (6.14)$$

Константа C зависит от формы поперечного сечения каналов и может быть определена экспериментальным либо расчетным путем.

Для турбулентного режима при $\text{Re} < 10^5$ используется эмпирическая формула

$$\lambda = 0,3164 / \text{Re}^{0,25}. \quad (6.15)$$

Величина $K(x)$ возрастает по длине начального участка, достигая в области полностью развитого течения значения $K = \text{const}$. Для определения величины K используется выражение

$$K = K' + \frac{K''}{\text{Re}}, \quad (6.16)$$

где K' — коэффициент Хагенбаха, K'' — коэффициент Куэтта.

Эта зависимость не является непосредственным решением уравнений движения, однако из анализа уравнений пограничного слоя следует, что при высоких скоростях $\Delta p / (\rho \omega^2) = K'$, а в случае «ползучих» течений $\frac{\Delta p}{\rho \omega^2} = \frac{K''}{\text{Re}}$. Коэффициент Хаген-

баха, согласно литературным данным, находится в пределах 2,16—5,48. Коэффициент Куэтта, полученный различными авторами, даже для простейшего случая движения на входе в круглую трубу находится в диапазоне 0—52,4.

Составляющей общей динамической потери давления при движении газа в насадках различного профиля является также потеря напора, обусловленная увеличением поперечного сечения потока на выходе из каналов.

Зависимости для определения гидравлических сопротивлений пленочных аппаратов при противоточном течении пара и жидкости можно условно разделить на следующие группы:

1. Зависимости в форме уравнений, применяемых для однофазного движения газа. Используется относительная скорость движения газа и жидкости; эквивалентный диаметр определяется с учетом сужения канала жидкостью.

Эти зависимости дают точное значение гидравлического сопротивления лишь в трубках и плоскопараллельной насадке при ламинарном безволновом течении жидкости ($Re_{ж} < 16 \div 30$). Однако экспериментальные исследования показали, что их можно с успехом использовать также и в области первого волнового режима течения жидкости ($Re_{ж}^n \leq Re_{ж} \leq 4,74 \sqrt[5]{\frac{\sigma^3}{\rho_{ж}^4 \rho_{ж}^5}}$).

2. Зависимости, содержащие ту или иную комбинацию независимых переменных, учитывающих геометрические характеристики каналов, расходы и физические свойства пара и жидкости.

Этим способом, например, К. Файндом получено выражение

$$\lambda = \frac{120}{D^{5,3}} + \frac{0,14}{D^{1,5}}, \quad (6.17)$$

где

$$D = C \frac{Re_r}{Re_{ж}^n} \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_r} \right)^{2,5} \left(\frac{\mu_r}{\mu_{ж}} \right)^{2,3} \left(\frac{\delta}{r} \right)^{1,2};$$

$C = 1,31$; $n = 1/4$ при $Re_{ж} < 160$ и $C = 4,76$, $n = 3,5$ при $Re_{ж} > 160$; r — радиус трубки.

3. Зависимости, сопоставляющие падение давления в орошаемых каналах с сопротивлением сухих каналов посредством независимых переменных, учитывающих расход и физические свойства жидкости. Для определения сопротивления плоскопараллельной насадки предложена эмпирическая зависимость

$$\frac{\Delta p_{ор}}{\Delta p_{сух}} = \frac{500}{d_s^{2,15}} \Gamma + 1; \quad (6.18)$$

для рифленой насадки с углом рифления 90°

$$\frac{\Delta p_{ор}}{\Delta p_{сух}} = 1,8 \omega_n^{1,5} (\Gamma \cdot 10^4)^{0,8}, \quad (6.19)$$

для трубчатых аппаратов

$$\frac{\lambda_{ор}}{\lambda_{сух}} = 1 + 3,97 \cdot 10^{-3} Re_{ж}^{0,476} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_n} \right)^{0,271}. \quad (6.20)$$

В результате совместного использования методик 2 и 3 получена зависимость для определения сопротивления насадок, образованных чередующимися плоскими и гофрированными листами,

$$Eu_{ор} = Eu_{сух} (1 + 7,61 Fr^{0,58} We^{0,95} Re_n^{0,23}). \quad (6.21)$$

4. Зависимости, использующие модель раздельного течения фаз. Одна из возможных моделей связана с корреляционным методом, разработанным Мартинелли.

Весьма простую модель раздельного течения можно получить, исходя из предположения, что обе фазы движутся без взаимодействия в двух цилиндрах и суммарное сечение этих цилиндров равно сечению данной трубы. Потери давления в каждом из гипотетических цилиндров предполагаются такими, как и в реальном потоке, и рассчитываются по теории однофазного течения. Эта модель течения обладает тем преимуществом, что может быть описана аналитически. Результатом такого подхода является соотношение

$$\left(\frac{1}{\Phi_r^2} \right)^{1/n} + \left(\frac{1}{\Phi_{ж}^2} \right)^{1/n} = 1, \quad (6.22)$$

где $n = 2$ для ламинарного течения; $n = 2,375 \div 2,5$ для турбулентного течения при использовании коэффициента трения; $n = 2,5 \div 3,5$ для турбулентного течения, рассчитываемого по теории пути перемешивания;

$$\Phi_r = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_r}; \quad \Phi_{ж} = \frac{dp/dz}{(dp/dz)_{ж}}.$$

Уравнение (6.22) определяет однопараметрическое семейство кривых, которые можно использовать также при анализе экспериментальных данных.

5. Обобщенные зависимости для определения гидравлических сопротивлений (см. § 6.4). Сопротивление слоя насыпной насадки рассчитывается по уравнению перепада давления в однофазном потоке

$$\Delta p = \lambda \frac{H}{d_s} \cdot \frac{\rho w^2}{2} = \lambda \frac{H}{d_s} \cdot \frac{\omega_n^2}{2e^2}, \quad (6.23)$$

где $d_s = 4e/a_0$; e — свободный объем насадки; w — скорость пара в каналах насадки; ω_n — скорость в полном сечении колонны.

Величина λ зависит от типа насадки и числа Рейнольдса [$Re = \omega_n d_n / (\nu)$] парового потока. Для колец Рашига [28]:

$$\lambda = 400/Re^{0,85} \text{ при } Re < 80; \quad (6.24)$$

$$\lambda = 70/Re^{0,45} \text{ при } 80 \leq Re \leq 400; \quad (6.25)$$

$$\lambda = 16,5/Re^{0,2} \text{ при } Re > 400. \quad (6.26)$$

Для седлообразной сетчатой насадки в области скоростей пара $w_n = 0,15 \div 2,0$ м/с [15]

$$\lambda = 12/\text{Re}_n^{0,2} \quad (6.27)$$

Сопротивление двухфазного потока в насадочных колоннах определяется преимущественно по зависимостям, сопоставляющим падение давления в орошаемых насадках с сопротивлением сухих насадок. В качестве независимых переменных используются расходы и физические свойства пара и жидкости. Для колец Рашига [28]:

$$\begin{aligned} \text{при } \left(\frac{L}{G}\right)^{1,8} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right) \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_n}\right)^{0,2} < 0,5 \\ \left(\frac{\Delta p}{H}\right)_{\text{оп}} = \left(\frac{\Delta p}{H}\right)_{\text{сух}} \left[1 + C_1 \left(\frac{L}{G}\right)^{0,405} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)^{0,225} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_n}\right)^{0,015}\right], \end{aligned} \quad (6.28)$$

где $C_1 = \exp(3,0w_n/w_n^{\text{нр}} - 0,853) - 0,175$;

$$\begin{aligned} \text{при } \left(\frac{L}{G}\right)^{1,8} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right) \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_n}\right)^{0,2} \geq 0,5 \\ \left(\frac{\Delta p}{H}\right)_{\text{оп}} = \left(\frac{\Delta p}{H}\right)_{\text{сух}} \left[1 + C_2 \left(\frac{L}{G}\right)^{0,945} \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)^{0,325} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_n}\right)^{0,105}\right], \end{aligned} \quad (6.29)$$

где $C_2 = \exp(3,0w_n/w_n^{\text{нр}} - 0,853) + 1,39$.

У седлообразной сетчатой насадки [15]

$$\left(\frac{\Delta p}{H}\right)_{\text{оп}} = \left(\frac{\Delta p}{H}\right)_{\text{сух}} \frac{1}{(0,75 - 0,45A)^2}, \quad (6.30)$$

где A — безразмерный параметр орошения;

$$A = 5,727 \cdot 10^{-8} \left(\frac{q^2 a_0}{g \varepsilon^3 \rho_{ж}^2 \text{Re}_{ж}^{0,3}}\right)^{1,3};$$

q — плотность орошения, кг/(м²·с); $\text{Re}_{ж}$ — число Рейнольдса жидкости, $\text{Re}_{ж} = 4q/(a_0 \mu_{ж})$.

Для сетчатых колец с вертикальной перегородкой [52]

$$\frac{\Delta p}{H} = \lambda_{\text{оп}} \frac{a_0 w_n^2 \rho_n}{8g(\varepsilon - \Delta)^3}, \quad (6.31)$$

где $\lambda_{\text{оп}} = 12/\text{Re}_n^{0,2}$; Δ — удерживающая способность,

$$\Delta = 10 \text{Re}_{ж}^{1,3} (a_0 \mu_{ж} / \rho_{ж})^{2,3}.$$

6.4. Обобщенные методы расчета гидравлических сопротивлений аппаратов пленочного типа

При математическом моделировании и оптимизации аппаратов целесообразно использовать обобщенные зависимости, пригодные в максимальном диапазоне независимых переменных. В качестве последних желательно использовать величины, которые могут быть непосредственно измерены либо вычислены.

Обобщенное уравнение для давления в условиях стационарного двухфазного течения имеет вид

$$\frac{\Delta p}{\rho w^2} = f\left(\frac{H}{d_s}, \text{Re}_r, \text{Re}_{ж}, \dots, l_1, l_2, \dots\right). \quad (6.32)$$

При однофазном ламинарном движении газа по каналам постоянного поперечного сечения коэффициент сопротивления трения с учетом местных потерь, обусловленных стабилизацией течения на входе и внезапным расширением потока на выходе, определяется выражением

$$\lambda = \frac{C}{\text{Re}_r} + \frac{d_s}{H} \Sigma \xi. \quad (6.33)$$

Форма уравнения (6.33) удобна для вычисления коэффициента сопротивления, в связи с чем ее целесообразно следующим образом модифицировать для двухфазного течения:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{\lambda}{1-y}, \quad 0 \leq y < 1, \quad (6.34)$$

где $y = (\lambda_{\text{оп}} - \lambda)/\lambda_{\text{оп}}$ — некоторая функция тех же независимых переменных, что и функция (6.32).

Используя традиционную форму уравнения, определяющего зависимую переменную в функции безразмерных величин, получим

$$y = a_0 \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i}. \quad (6.35)$$

При соответствующем выборе независимых переменных уравнение (6.35) может быть использовано для обобщения экспериментальных данных и расчета гидравлических сопротивлений в широком диапазоне геометрических и режимных параметров.

В качестве независимых переменных уравнения (6.35) целесообразно применять числа Re_r , $\text{Re}_{ж}$ и геометрические факторы ϕ/d_s и C . Величина ϕ — приведенная толщина жидкой пленки, величина $C = \lambda \text{Re}_r$ — фактор, определяемый формой канала. Таким образом, получим

$$y = a_0 C^{\alpha_1} \text{Re}_{ж}^{\alpha_2} \text{Re}_r^{\alpha_3} (\phi/d_s)^{\alpha_4}. \quad (6.36)$$

Обычно для определения параметров уравнения вида (6.36) его линеаризуют логарифмированием. Поскольку минимумы функционалов

$$S_L = \sum_{i=1}^n (\ln y_i - \ln \hat{y})^2 \quad \text{и} \quad S_N = \sum_{i=1}^n (\lambda_{op i} - \hat{\lambda}_{op i})^2$$

в пространстве параметров не совпадают, полученные для выражения (6.36) оценки a_0 — a_4 следует уточнить, используя уравнение

$$\lambda_{op} = \frac{C}{Re_r(1-y)} + \frac{\sum \xi_i}{1-y} \cdot \frac{d_2}{H}. \quad (6.37)$$

Приближенные доверительные интервалы для вектора параметров a могут быть вычислены путем линеаризации нелинейной модели в пространстве параметров вблизи оценки a^* , полученной методом наименьших квадратов, разложением в ряд Тейлора и отбрасыванием членов второго и более высоких порядков.

100(1- α)%-ные индивидуальные доверительные интервалы для линеаризованной модели имеют вид

$$a_i - t_{1-\alpha/2} S_{y_i} \sqrt{I_{ii}} \leq a_i^* < a_i + t_{1-\alpha/2} S_{y_i} \sqrt{I_{ii}}, \quad i=0, 1, \dots, m, \quad (6.38)$$

где I_{ii} — диагональные элементы матрицы $I = (X^T X)^{-1}$; S_{y_i} — оценка стандартной ошибки; t — безразмерная t -статистика Стьюдента; α — уровень значимости.

Так, для $\alpha=0,05$ и $n-m=125$ степеней свободы $t_{1-\alpha/2}=1,96$. Если повторные измерения не проводятся, в качестве оценки S_{y_i} используется величина

$$S_r = \sqrt{S_N/(n-m)}. \quad (6.39)$$

Оценки параметров a_i , индивидуальные 95%-ные доверительные интервалы для a_i , сумма квадратов отклонений S_N и среднее относительное отклонение M , найденные на основе данных табл. 6.1, приведены в табл. 6.2.

Иллюстрацией полученных результатов является зависимость на рис. 6.1. Расхождения в значениях λ_{op} , вычисленных по урав-

Таблица 6.1

Характеристики опытных данных				
Тип насадки	$Re_{ж}$	Re_r	$(d_2/H) \cdot 10^2$	C
Синусоидальная	10—35	200—800	5—9	50
Гофрированная	20—85	450—1900	3—4	81,7
Трубка с орошаемыми стенками	5—400	630—1630	1—5	64

нению (6.37) и полученных на основе опытных данных в условиях совместного теплообмена, находятся в пределах погрешности измерения гидравлических сопротивлений.

Иной подход к созданию обобщенного уравнения состоит в следующем. Анализ экспериментальных работ, посвященных гидродинамике двухфазного противоточного течения пара и жидкости, показывает, что конфигурация поверхности в пространстве Eu , Re_n , $Re_{ж}$ либо λ , Re_n , $Re_{ж}$ качественно одинакова

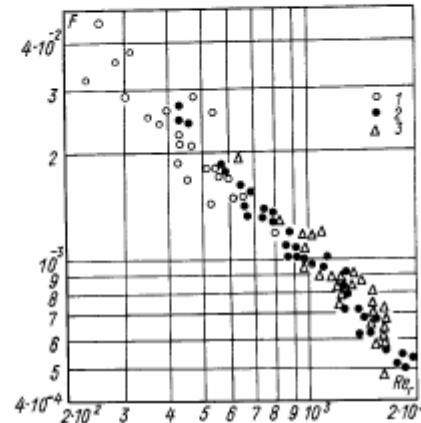


Рис. 6.1. Зависимость величины $F = c^{-1} [\lambda_{op}(1-y) - \frac{d_2}{H} \sum \xi_i]$ от числа Re_r для ряда поверхностей контакта
1 — насадка из чередующихся плоских и гофрированных листов (синусоидальная);
2 — насадка из гофрированных листов; 3 — трубка

для разных веществ и каналов. При $Re_{ж} = \text{const}$ с увеличением нагрузки по газу величина Eu (либо λ) монотонно уменьшается до некоторого значения, соответствующего предельному случаю противоточного движения фаз; минимум функции $Eu = f(Re_n)$ определяет начало захлебывания аппарата.

Таблица 6.2

Параметры уравнения (6.36) и их индивидуальные доверительные интервалы						
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	S_N	M
828,6271	-2,4396	0,2609	-0,0571	-0,3090	0,1326	0,1137
$\pm 183,3163$	$\pm 0,0516$	$\pm 0,0127$	$\pm 0,0140$	$\pm 0,0192$	—	—

Это дает основание предположить, что для различных каналов и свойств потоков зависимости $Eu=f(Re_n)$ подобны и в приведенных координатах должны совпасть между собой. Масштаб приведения может быть выбран на основании сходственных точек. С физической и геометрической позиций в качестве сходственной целесообразно использовать точку начала захлебывания ($Eu_{кр}$, $Re_{н,кр}$), поскольку она характеризует идентичные гидродинамические режимы и соответствует минимуму функции. Таким образом, принимая приведенные (или относительные) координаты

$$Eu^* = \frac{Eu}{Eu_{кр}} \quad \text{и} \quad Re_n^* = \frac{Re_n}{Re_{н,кр}}$$

можно получить обобщенную зависимость $Eu^*=\psi(Re_n^*)$ для каналов различной формы.

Практически все имеющиеся в литературе экспериментальные данные, представленные в координатах Eu^* , Re_n^* , образуют группы, соответствующие идентичным гидродинамическим режимам движения газа и жидкости (рис. 6.2). Можно видеть, что в пределах указанных групп, несмотря на существенные различия геометрических характеристик каналов и физических свойств взаимодействующих потоков, опытные данные удовлетворительно согласуются.

Так как зависимости $Eu=f(Re_n)$ в приведенных координатах совпадают, есть основание полагать, что кривые, образованные совокупностью точек захлебывания, тоже могут быть описаны одной обобщенной зависимостью. Так, опытные данные, представленные в координатах

$$Eu_{кр}^* = \frac{Eu_{кр1}}{Eu_{кр2}} \quad \text{и} \quad Re_{ж1}^* = \frac{Re_{ж1}}{Re_{ж2}}$$

удовлетворительно группируются около одной кривой (рис. 6.3).

В результате обобщения практически всех опубликованных данных получены уравнения, описывающие:

ламинарный режим движения пара ($Re_n < 1800$) и первый волновой режим движения жидкости ($Re_{ж} < 140$),

$$Eu^* = (Re_n^*)^{0,59} Re_n^{*-0,97}; \quad (6.40)$$

турбулентный режим движения пара ($Re_n > 2500$) и первый волновой режим жидкости,

$$Eu^* = (Re_n^*)^{0,31} Re_n^{*-0,42}; \quad (6.41)$$

турбулентный режим движения пара и второй волновой режим жидкости ($160 < Re_{ж} < 1000$),

$$Eu^* = (Re_n^*)^{0,41} Re_n^{*-0,62}; \quad (6.42)$$

обобщенную кривую захлебывания,

$$Eu_{кр}^* = (Re_n^*)^{0,058} Re_{ж}^{*+0,11}. \quad (6.43)$$

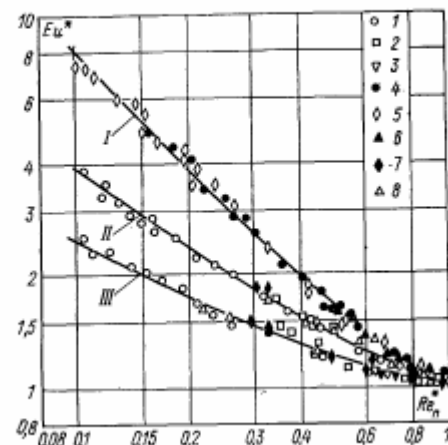


Рис. 6.2. Зависимость $Eu^*=f(Re_n^*)$

I — ламинарный режим движения пара и первый волновой режим жидкости; II — турбулентный режим движения пара и второй волновой — жидкости; III — турбулентный режим движения пара и первый волновой — жидкости; 1, 2, 3 — трубки; 4, 5 — ступенчатые насадки; 6, 7, 8 — насадки из гофрированных листов

Среднее относительное отклонение экспериментальных данных от расчетных составило 3,27%; 3,64%; 4,83%; 3,48% соответственно для зависимостей (6.40) — (6.43).

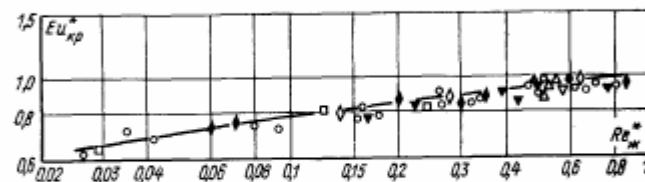


Рис. 6.3. Зависимость $Eu_{кр}^*=f(Re_{ж}^*)$

Обозначения точек те же, что на рис. 6.2

Зависимости $Eu^*=\psi(Re_n^*)$ и $Eu_{кр}^*=f(Re_{ж}^*)$ позволяют для данного канала установить связь между числами Eu для любых двух режимов с различными нагрузками по пару и жидкости Eu_1 ; $Re_{н1}$ и Eu_2 ; $Re_{н2}$; $Re_{ж2}$:

$$\frac{Eu_1}{Eu_2} = \frac{\Psi_1(Re_{n1}^*) f(Re_{ж}^*)}{\Psi_2(Re_{n2}^*)} \quad (6.44)$$

или

$$Eu_2 = Eu_1 (Re_{n2}^*)^{a_2} Re_{n2}^{*+b_2} (Re_{n1}^*)^{-a_1} Re_{n1}^{*+b_1} (Re_{ж}^*)^{-a} Re_{ж}^{*-b}. \quad (6.45)$$

Таким методом можно по одной опорной точке полностью определить гидравлические сопротивления аппарата при произвольных нагрузках по газу и жидкости.

Опорная точка устанавливается по расчетной зависимости для перепада давления в неорошаемом канале. Для этого достаточно учесть сужение канала и относительную скорость движения пара и жидкости. Поскольку такой вывод является точным лишь для ламинарного безволнового движения пленки, опорные точки проверочного расчета выбраны при $Re_{ж} = 20$. Среднее относительное отклонение чисел Eu , вычисленных на основе обобщенного метода, от найденных опытным путем в вышеуказанных работах составило 13,2 %. Полученное отклонение является результатом как приближенности метода, так и разброса использованных экспериментальных данных.