УДК 66.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ КЛАПАННОЙ ТАРЕЛКИ С КРУГЛЫМ ПОЛНОПОДЪЁМНЫМ КЛАПАНОМ

RESEARCH HYDRODINAMICS OF VALVE TRAY WITH A ROUND FULL-LIFT VALVE

Константинов Е.К.
ведущий инженер-технолог,
Научно-исследовательский проектный институт технологии энергетики, нефти и газа, г. Уфа
george.coin2@gmail.com

Аннотация. Методом физического моделирования на экспериментальном стенде получены экспериментальные данные по сухому перепаду давления на клапанной тарелке с круглым полноподъёмным клапаном, обратным методом гидравлических аналогий получено уравнение расчёта перепада давления для всех степеней открытия клапанов, что может быть использованы для исследования и расчета гидродинамики клапанных тарелок при проектировании тепло-массообменных аппаратов химической технологии, проведения технологического аудита тепло-массообменного оборудования.

Ключевые слова: гидродинамика, клапанная тарелка, перепад давления математическое моделирование, ректификация.

Konstantinov E.K.
Leading Process Engineer,
Scientific Research Design Institute Technologies of Energy, Oil and Gas, Ufa
george.coin2@gmail.com

Annotation. Experimental data on dry pressure drop across a valve tray with a circular, full-lift valve were obtained using the method of physical modeling on a test rig. An equation for calculating the pressure drop for all valve opening degrees was derived using the inverse method of hydraulic analogies. These results can be utilized for the study and calculation of valve tray hydrodynamics during the design of heat and mass transfer equipment in chemical technology, and for conducting technological audits of heat and mass transfer equipment.

Keywords: hydrodynamics, valve plate, pressure drop, mathematical modeling, rectification.

Гидравлическое сопротивление тарелок является одним из ключевых показателей работы не только каждой отдельной тарелки, но и всего аппарата в целом. Перепад давления по колонне, помимо непосредственного влияния на тепломассообмен в колонне, определяет нагрузку на перекачивающее оборудование, на теплообменное оборудование, предохранительные клапаны, факельные системы и прочее. Особенно актуальна проблема перепада давления для колонн, работающих под вакуумом. Поэтому при подборе внутренних контактных устройств крайне актуален точный расчет их гидравлического сопротивления.

Перекрёстноточные клапанные тарелки на сегодняшний день занимают значительную долю внутренних контактных устройств фракционирующего колонного оборудования. Они обладают широким диапазоном устойчивой работы, что позволяет получать стабильную высокую эффективность работы при различной загрузке колонны. На рисунке 1 представлена секция колонны, снабженной однопоточными клапанными тарелками.

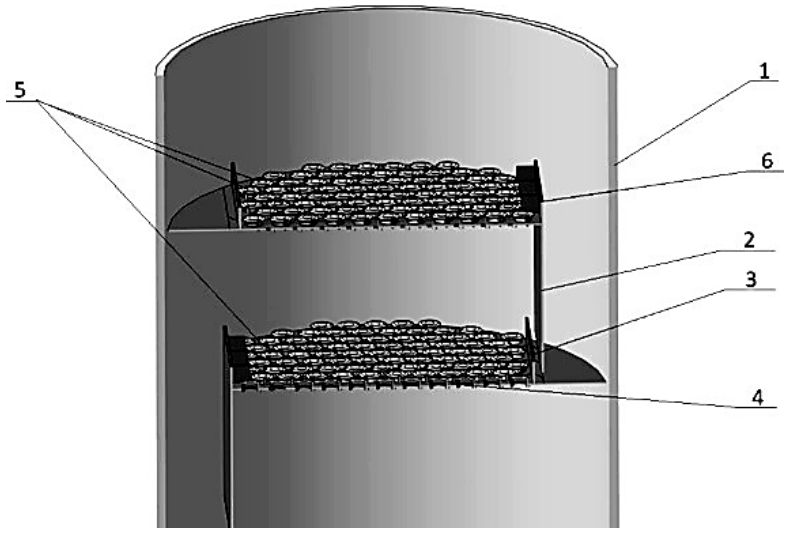

Рисунок 1 – Секция колонны, снабженной однопоточными клапанными тарелками:
1 – корпус колонны; 2 – корпус переливного кармана; 3 – затворная планка;
4 – полотно тарелки; 5 – клапаны, 6 – переливная планка

Существенный вклад в перепад давления тарельчатых контактных устройств формирует «сухой» перепад, обусловленный гидравлическим сопротивлением самой тарелки [1–4]. Расчет гидравлического сопротивления сухой тарелки в турбулентном потоке жидкости, рассчитывается по формуле Вейсбаха [5]:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; ω – скорость газа/жидкости, м/с; ρ – плотность газа/жидкости, кг/м^3.

Скорость газа определяется геометрией контактного устройства и расходом газа, коэффициент гидравлического сопротивления определяется конструктивными особенностями клапанов. Таким образом, исследуя зависимость перепада давления от расхода газа через контактное устройство, возможно получить коэффициент гидравлического сопротивления для каждой конкретной конструкции клапанной тарелки.

Для определения коэффициентов гидравлического сопротивления клапанной тарелки была проведена серия экспериментов на испытательном стенде. Для исследования «сухого» перепада давления гидрозатворы тарелок были предварительно заглушены. Методика эксперимента заключается в пропускании воздуха через стенд, на котором укреплены клапанные тарелки и измерение перепада давления на них при помощи диф. манометров. В результате проведенной серии экспериментов были получены данные по сухому перепаду давления на клапанной тарелке. Экспериментальные данные представлены на рисунке 2.

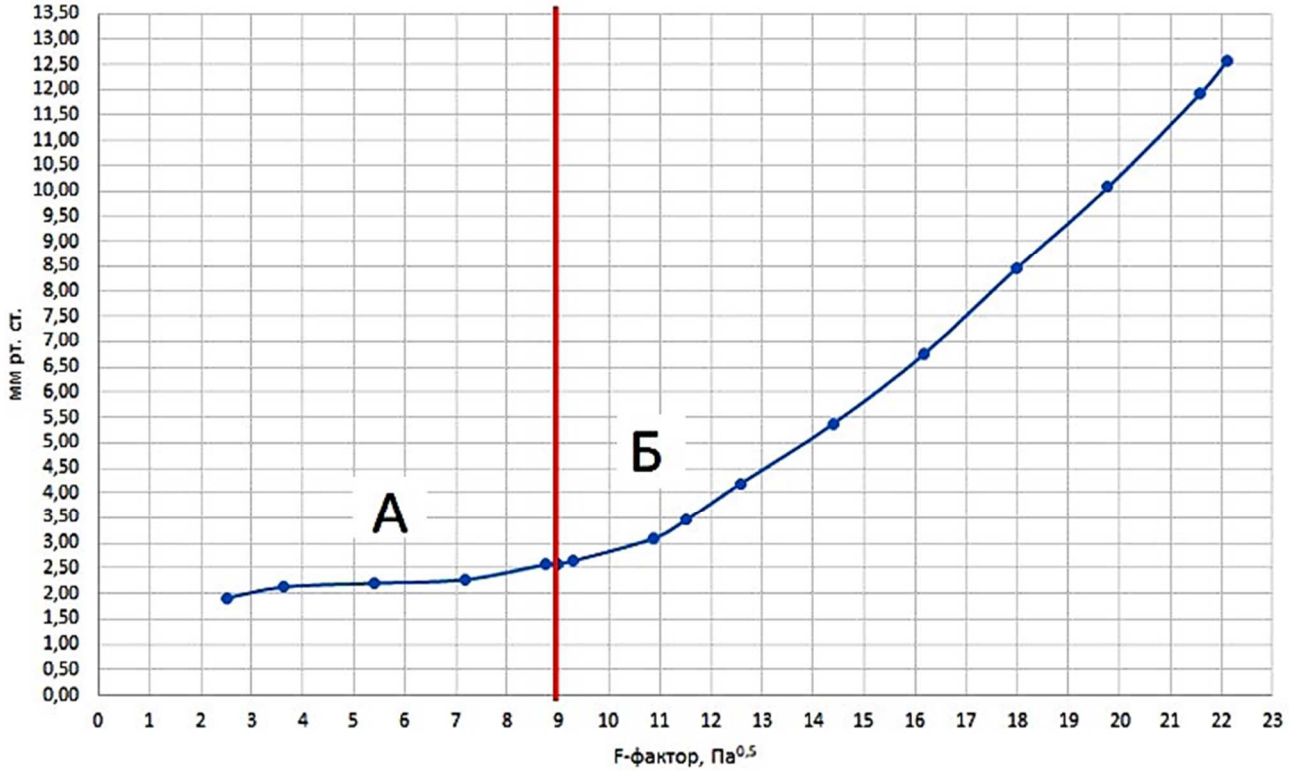

Рисунок 2 – Зависимость перепада давления от F-фактора в клапанах

Из графика отчетливо выделяются две области – область, характеризующаяся низким изменением перепада давления – область А, в которой происходит открытие клапанов с сохранением постоянной скорости в клапанах и область Б – в которой начинается быстрое изменение перепада давления, пропорционально квадрату скорости газа в клапанах. В области Б, все клапаны находятся в открытом положении, при этом достигается максимальная площадь зеркала барботажа. На рисунке 3 приведена зависимость перепада давления на тарелке от кинетического напора газа в клапанах.

Зависимость перепада давления от кинетического напора в области Б представляет собой прямую линию, коэффициент пропорциональности которой и является коэффициентом гидравлического сопротивления.

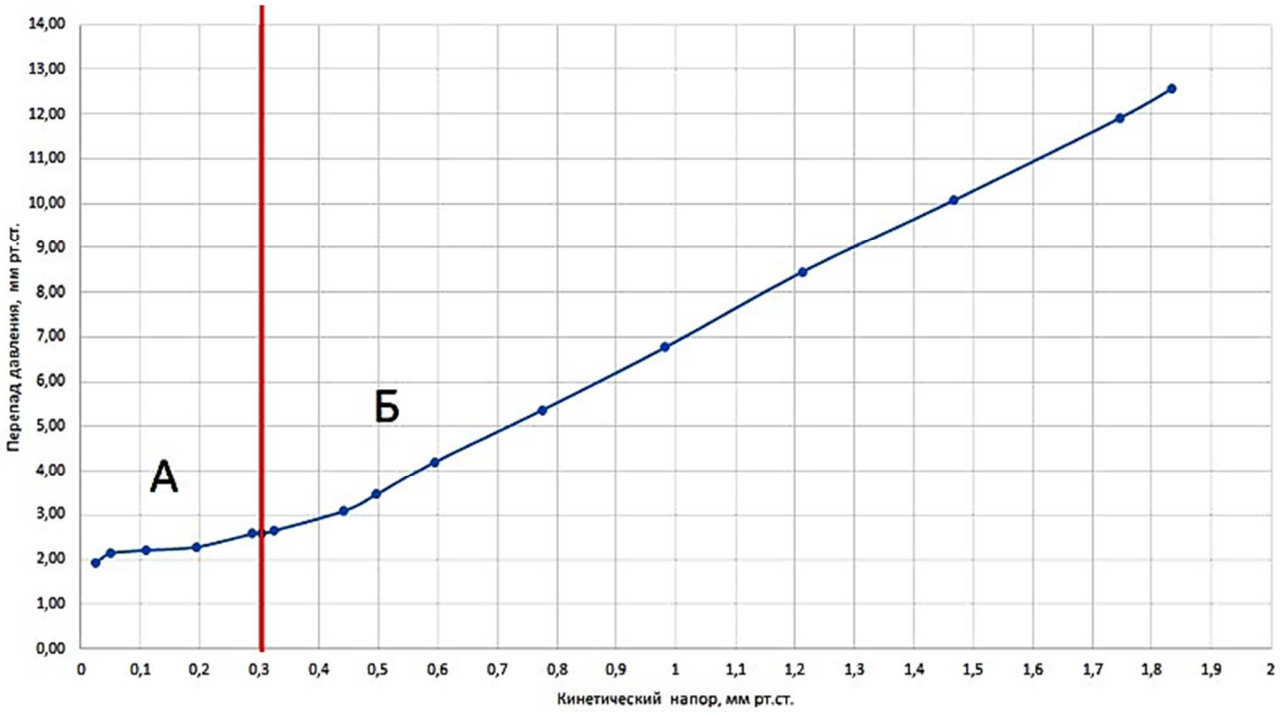

Рисунок 3 – Зависимость перепада давления от кинетического напора газа в клапанах

Анализируя полученные данные по перепаду давления от кинетического напора в области Б, методом наименьших квадратов было получено уравнение регрессии вида $y = kx$. $\Delta P = 6.88 \cdot \frac{\rho\omega^2}{2}$, где $\omega = \frac{V}{S_{клап}}$ – скорость газа в свободном сечении клапанов, $S_{клап} = N_{клап}\ \pi d_{клап}\ h$, V – объемный расход газа через тарелку. Из полученного уравнения регрессии видно, что коэффициент гидравлического сопротивления открытых клапанов клапанной тарелки с диаметром клапана 38 мм и высотой поднятия 5 мм составляет 6.88. Графическая интерпретация анализа эксперимента представлена на рисунке 4.

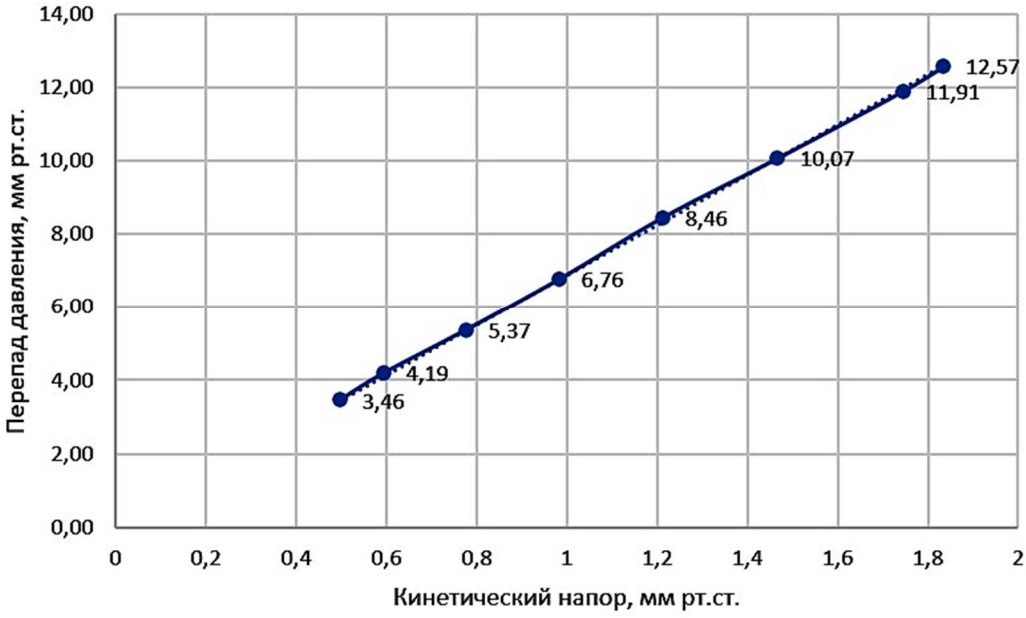

Рисунок 4 – Аппроксимация полученных данных по перепаду давления линейным методом

Как видно из формулы Вейсбаха, коэффициент гидравлического сопротивления является отношением перепада давления к кинетическому напору жидкости/газа. Соответственно, для каждой полученной точки можно получить свой коэффициент гидравлического сопротивления, характеризу-

ющий текущую гидродинамику. На рисунке 5 показана зависимость полученного для каждой экспериментальной точки коэффициента гидравлического сопротивления от скорости газа в свободном сечении клапанов. Экстраполяция полученной зависимости до точки пересечения с осью ординат даёт коэффициент гидравлического сопротивления технологических отверстий закрытых клапанов.

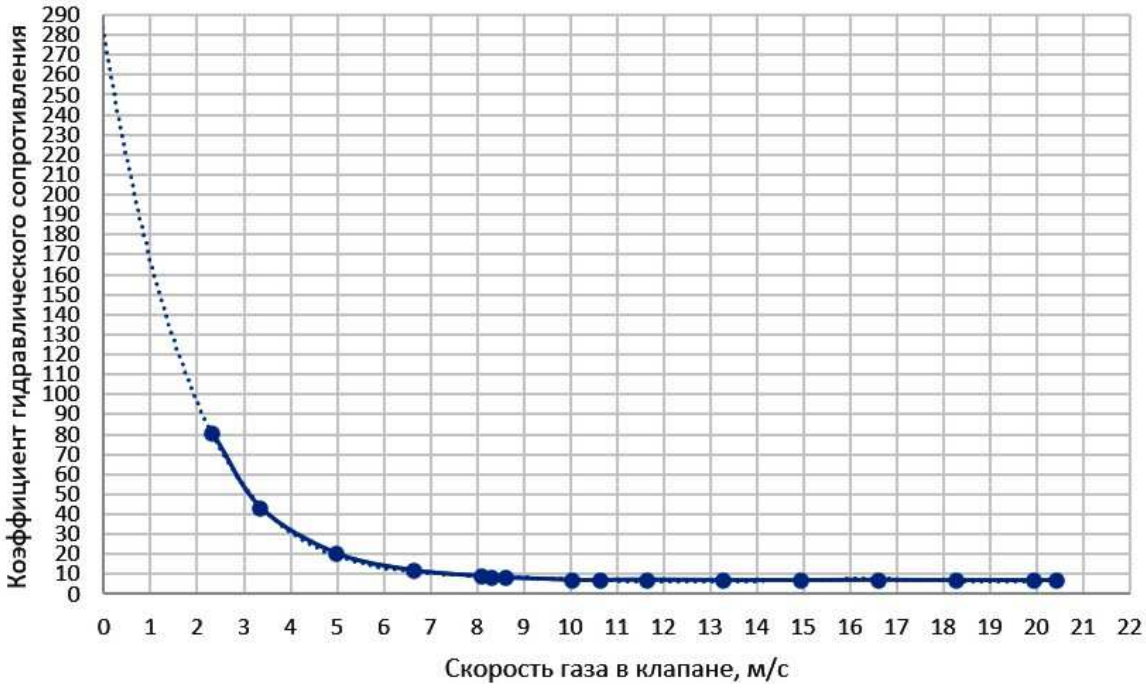

Рисунок 5 – Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления тарелки от скорости газа в свободном сечении клапанов

Как видно из проведенного анализа, коэффициент гидравлического сопротивления технологических отверстий зазоров исследуемого клапана составляет 285.

Расчет гидравлического сопротивления клапанной тарелки по отраслевому стандарту [6] предполагает значения коэффициентов гидравлического сопротивления равные 4.7 для открытых клапанов и 215 для технологических зазоров закрытых клапанов. Это связано с тем, что отраслевой стандарт рассчитан на клапан, отличающийся от исследуемого.

Определив коэффициенты гидравлического сопротивления экспериментальным путем, для исследуемой тарелки, становится возможно рассчитать коэффициент открытия клапанов, показывающий какая часть клапанов открыта при заданных паровых нагрузках на тарелку:

$$K_{\text{откр}} = \frac{1{,}5}{\sqrt{\frac{2q}{\omega^2 \cdot \rho} - 0.82}}, \tag{2}$$

где q – удельная весовая нагрузка клапана, Па:

$$q = \frac{m_{\text{клап}}}{0.785 d_{\text{клап}}^2}, \tag{3}$$

Для исследуемого клапана удельная весовая нагрузка составила 173 Па. Согласно экспериментальным данным в момент открытия всех клапанов, скорость в свободном сечении составила 8.6 м/с, следовательно, при $K_{\text{откр.}} = 1$ и $\omega = 8.6$ м/с удельная весовая нагрузка клапанов составит 133.2 Па, что соответствует массе клапана 15 грамм, в то время как реальная масса составляет 20 грамм, следовательно, эмпирический коэффициент для исследуемого клапана составляет 1.69 и формула определения коэффициента открытия клапанов принимает вид:

$$K_{\text{откр}} = \frac{1.69}{\sqrt{\frac{346}{\omega^2 \cdot \rho} - 0.82}}, \tag{4}$$

Для составления формулы для вычисления полного сухого перепада давления от расхода газа через клапанную тарелку воспользуемся обратным методом гидравлических аналогий, описанный нами ранее.

На рисунке 6 представлена схема прохождения пара через сухую клапанную тарелку.

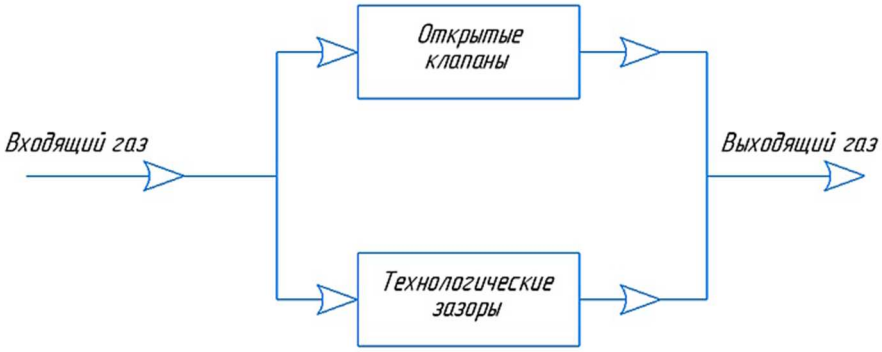

Рисунок 6 – Схема прохождения пара через клапанную тарелку

Так как перепад давления на параллельных участках одинаковый, получаем выражение соотношения скоростей газа в открытых клапанах и технологических зазорах:

$$\omega_{\text{заз}} = \omega_{\text{отк}} \cdot \sqrt{\frac{\xi_{\text{к}}}{\xi_{\text{ш}}}}, \tag{5}$$

Суммарная максимальная площадь для прохода газа достигается при полном открытии всех клапанов. Отношение свободного сечения прохода пара к площади всей тарелки называется рабочим относительным сечением тарелки. В действительности, в диапазоне нагрузок, в котором не достигается полного открытия клапанов, клапаны колеблются по высоте около некоторого промежуточного положения, периодически открываясь и закрываясь, пребывая в состоянии динамического равновесия – закрытие каждого отдельного клапана приводит к открытию другого клапана, в результате чего поддерживается постоянное сечение для прохода пара. Для математического моделирования такого динамического равновесия удобно прибегнуть к двум крайним положениям – полностью закрытым клапанам и полностью открытым. Таким образом, некоторая часть клапанов является полностью открытыми, и газ истекает из их свободного сечения для прохода пара, а другая часть является полностью закрытыми, и газ истекает через технологические зазоры клапана – промежутки между лапок клапана и щели, образованные неплотным прилеганием клапана к полотну тарелки, предусмотренные для предотвращения залипания клапанов в закрытом положении. Отношение количества открытых клапанов к общему количеству клапанов на тарелке характеризует коэффициент открытия клапанов. Для определения коэффициента открытия клапанов была использована формула из отраслевого стандарта расчета клапанных тарелок [6], приведенной в актуальный вид для исследованного вида клапанной тарелки:

$$K_{\text{откр}} = \frac{1.69}{\sqrt{\frac{2q}{\omega^2 \cdot \rho} - 0.82}}, \tag{6}$$

где q – удельная весовая нагрузка клапана, Па;

Выразим расходы газа через открытые клапаны:

$$V_{\text{отк}} = \omega_{\text{отк}} \cdot S_{\text{клап}} \cdot K_{\text{откр}}, \tag{7}$$

И технологические зазоры:

$$V_{\text{заз}} = \omega_{\text{зак}} \cdot S_{\text{клап}} \cdot (1 - K_{\text{откр}}), \tag{8}$$

Принимая во внимание соотношение скоростей (8), получили:

$$V_{\text{заз}} = \omega_{\text{отк}} \cdot \sqrt{\frac{\xi_{\text{к}}}{\xi_{\text{ш}}}} \cdot S_{\text{клап}} \cdot (1 - K_{\text{откр}}), \tag{9}$$

В сумме два этих расхода дают полный расход газа через тарелку:

$$V = V_{\text{отк}} + V_{\text{заз}} = \omega_{\text{отк}} \cdot S_{\text{клап}} \cdot K_{\text{откр}} + \omega_{\text{отк}} \cdot \sqrt{\frac{\xi_{\text{к}}}{\xi_{\text{ш}}}} \cdot S_{\text{клап}} \cdot (1 - K_{\text{откр}}), \tag{10}$$

Путем преобразования данного выражения получили выражение для скорости газа в открытом сечении клапанов:

$$\omega_{\text{отк}} = \frac{V}{\frac{1.69 \cdot S_{\text{клап}}}{\sqrt{\frac{2qN^2\pi^2d^2h^2}{\rho V^2} - 0.82}} + \left(1 - \frac{1.69}{\sqrt{\frac{2qN^2\pi^2d^2h^2}{\rho V^2} - 0.82}}\right) \cdot S_{\text{клап}} \cdot \sqrt{\frac{\xi_{\text{к}}}{\xi_{\text{ш}}}}}. \quad (11)$$

Так как перепад давления одинаков в зазорах и в открытых клапанах, мы можем подставить данное выражение скорости в уравнение (1). Таким образом мы получаем формулу сухого перепада давления на клапанной тарелке с круглым полноподъёмным клапаном:

$$\Delta P = \frac{\rho \xi_{\text{к}} V^2}{2N^2\pi^2d^2h^2\left(\frac{1.69}{\sqrt{\frac{2qN^2\pi^2d^2h^2}{\rho V^2} - 0.82}} + \left(1 - \frac{1.69}{\sqrt{\frac{2qN^2\pi^2d^2h^2}{\rho V^2} - 0.82}}\right) \cdot \sqrt{\frac{\xi_{\text{к}}}{\xi_{\text{ш}}}}\right)^2}, \quad (12)$$

где N – число клапанов на тарелке; *d* – диаметр клапана, м; *h* – высота поднятия клапана, м.

На рисунке 7 представлены графики зависимости сухого перепада давления на клапанной тарелке, полученные экспериментальным и расчетным методами.

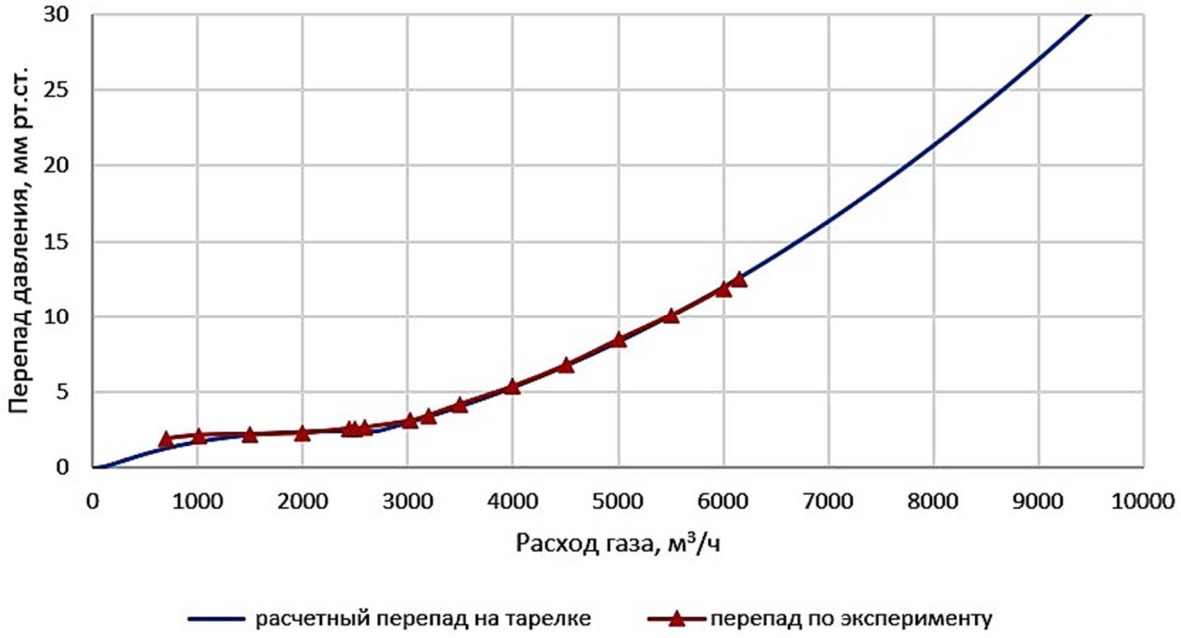

Рисунок 7 – Зависимость сухого перепада давления на клапанной тарелке от расхода газа

Среднее отклонение расчетных и фактических данных составляет 2,8%, среднеквадратическое отклонение около 0.054 мм рт. ст.

Как видно из представленного графика, полученное выражение для вычисления сухого перепада давления адекватно для исследованного типа клапанной тарелки.

Список литературы:

1. Позин Л.С. Химическое и нефтяное машиностроение. – 1969. – № 1. – С. 18–20.
2. Хайруллин, Н.А. Дис. … канд. техн. наук: защищена: 10.04.1984. – М., 1984. – 260 с.
3. Гинзбург М.С. дис. … канд. техн. наук. – М., 1974. – 138 с.
4. Петушинский Л.Н. дис. … канд. техн. наук – М., 1971. – 214 с.
5. Химическое и нефтяное машиностроение / Ю.И. Дытнерский [и др.]. – 1964. – № 2. – С. 15–20.
6. Отраслевой стандарт ОСТ 26-01-1488-83 «Аппараты колонные тарельчатые. Метод технологического и гидродинамического расчета».

List of references:

1. Pozin L.S. Chemical and Petroleum Engineering. – 1969. – № 1. – P. 18–20.
2. Khairullin N.A. Dissertation. … Cand. Tech. Sci.: defended: 10.04.1984. – M., 1984. – 260 p.
3. Ginzburg, M.S. Dissertation. … Cand. Tech. Sci. – M., 1974. – 138 p.
4. Petushinsky, L.N. Dissertation. … Cand. Tech. Sci. – M., 1971. – 214 p.
5. Chemical and petroleum engineering / Yu.I. Dytnersky [et al.]. – 1964. – № 2. – P. 15–20.
6. Industry Standard OST 26-01-1488-83 «Plate Column Apparatus. Method of Technological and Hydrodynamic Calculation».