

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ КОМБИНИРОВАННЫХ ТАРЕЛОК РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН

В.Н. МАМИН

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: tamin-v@mail.ru*

Приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики комбинированных провальных тарелок с мелкопризматической насадкой. Получены расчетные уравнения для определения гидравлического сопротивления тарелок.

Ключевые слова: колонна, гидродинамика, провальная тарелка, насадка, сопротивление, расчетные уравнения.

Создание малогабаритных ректификационных установок с гибкой схемой для утилизации вторичных ресурсов фермерских хозяйств, позволяющих получать экологически чистый этиловый спирт для производства настоек, крепких напитков (в том числе коньячных) и т.п. является актуальной задачей. Основной частью таких установок является ректификационная колонна, из-за небольших диаметров которой, изготовление, например, колпачковых или ситчатых тарелок с организованным переливом жидкости сложно, а заполнение всего объема колонны дорогостоящей мелкой насадкой из нихрома или нержавеющей стали повышает стоимость колонны в целом.

С целью упрощения конструкции и повышения эффективности работы предложено контактные устройства колонн изготавливать в виде провальных тарелок с небольшим слоем мелкой или призматической насадки, обладающей, как известно, повышенной разделяющей способностью и равномерным распределением жидкости по всему сечению колонны.

Для проведения гидродинамических исследований была изготовлена стеклянная колонна диаметром 56 мм, внутри которой устанавливались три контактных устройства. Эксперименты проводились на системе вода-воздух. Вначале испытывались только провальные тарелки со свободным сечением 16,4 %, с отверстиями 3,5 мм и межтарельчатым расстоянием 70 мм. Выявлено, что гидравлическое сопротивление сухих и орошаемых тарелок, предельно

<http://ntk.kubstu.ru/file/386>

допустимые скорости взаимодействующих фаз и режимы работы вполне сопоставимы с результатами многочисленных исследований колонн больших диаметров.

Для повышения эффективности контактных устройств поверхность провальных тарелок была снабжена мелкопризматической насадкой из нержавеющей стали высотой 30 мм. Диаметр насадки - 3 мм, высота – 3 мм, диаметр нержавеющей проволоки 0,2 мм, удельная поверхность насадки $a = 1880 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем насадки $V_c = 0,92 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободное сечение насадки f_c численно совпадает со свободным объемом. Исследование такого контактного устройства проводилось в той же последовательности, что и провальных тарелок.

Результаты экспериментальных исследований не орошаемых (сухих) контактных устройств представлены на рис. 1.

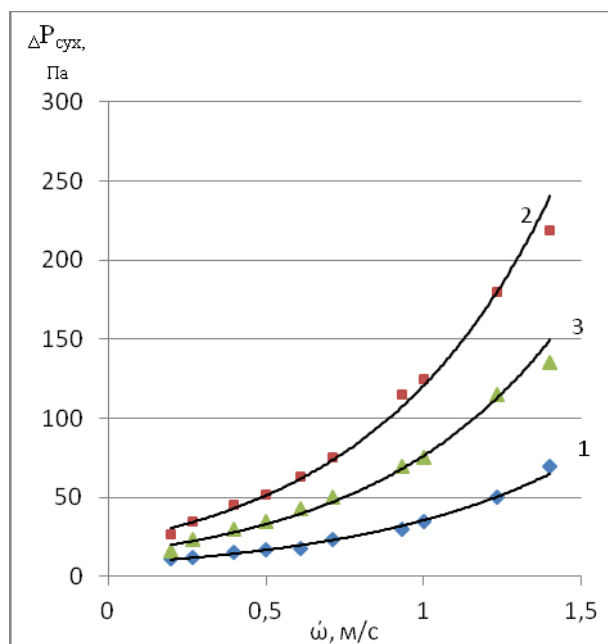


Рис. 1

Кривая 1 соответствует зависимости гидравлического сопротивления сухой провальной тарелки от скорости газа, рассчитанной на полное сечение колонны. Как видно из графика, оно монотонно возрастает пропорционально квадрату скорости газа. Как известно, сопротивление сухих провальных тарелок складывается из потерь на сжатие струи при входе в отверстие, трения в отверстиях и потерь на расширение струи при выходе из отверстия.

С достаточной степенью точности сопротивление провальной тарелки без учета толщины решетки может быть определено по уравнению:

$$\Delta P_{\text{сух}}^r = \xi (\omega_0^2 \gamma / 2g), \text{ Па}$$

(1)

где $\xi = 1,45$ – коэффициент сопротивления, практически независимый от размеров формы отверстий и способа распределения

по тарелке, для свободного сечения 16,4 %;

ω_0 - скорость газа в отверстии, м/с;

γ - удельный вес газа, н/м³.

Экспериментальная кривая 2 соответствует гидравлическому сопротивлению сухой провальной тарелки вместе со слоем насадки, т.е.

$$\Delta P_{\text{сух}} = \Delta P_{\text{сух}}^r + \Delta P_{\text{сух}}^n, \text{ Па}$$

(2)

Для определения зависимости сопротивления только насадки от скорости газа произведено графическое вычитание от данных, соответствующих кривой 2, данных, соответствующих кривой 1. Таким образом была построена зависимость, соответствующая кривой 3.

При движении газа (пара) через сухую насадку установлено три гидродинамических режима движения. Величиной, определяющей гидродинамический режим однофазного потока, является критерий Рейнольдса, для насадок имеющий вид

$$Re = (4\omega_0 \gamma) / (gaM_r),$$

(3)

где a – удельная поверхность насадки, м²/ м³;

M_r – кинематическая вязкость газа, м²/ с.

Наличие в колонне насадок приводит к турбулизации газового потока раньше, чем в гладких трубах, и поэтому критическое состояние наступает значительно раньше, чем в гладких незаполненных трубах. Область характеризуется как область течения без возникновения вихрей за обтекаемыми

элементами насадки, в то время как при обтекание элементов вызывает появление в потоке вихрей.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки высотой h может быть рассчитано по уравнению (4).

$$\Delta P_{\text{сух}}^H = h * ((2 \lambda \gamma \dot{\omega}^2) / (g d_3 V_c)) \quad (4)$$

где $d_3 = 4 V_c / a$ - эквивалентный диаметр насадки, м;

V_c – свободный объем насадки, м³/ м³.

Для корреляции экспериментальных и расчетных данных для различных скоростей газа были рассчитаны гидравлические сопротивления по уравнениям (1) и (4).

Сравнивая эти значения с соответствующими значениями экспериментальных данных по рис. 2 можно сделать вывод, что гидравлическое сопротивление с достаточной степенью точности можно рассчитать по уравнениям (1) и (4), т.к. ошибка находится в пределах $\pm 12 \%$.

На рис. 2 представлена зависимость гидравлического сопротивления одного контактного устройства от скорости воздуха, рассчитанной на полное сечение колонны, при плотности орошения $L = 1260 \text{ кг/м}^2 \text{ час}$.

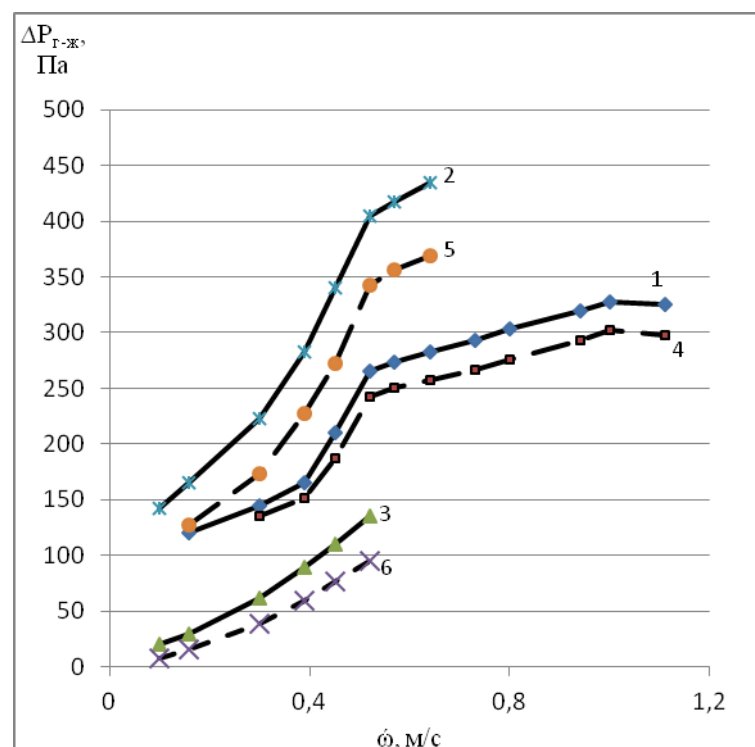


Рис. 2

Кривая 1 соответствует гидравлическому сопротивлению орошаемой провальной тарелки. Из графика следует, что гидравлическое сопротивление орошаемых тарелок, характерные переходные точки определенных режимов работы и предельно допустимые скорости взаимодействующих фаз вполне сопоставимы с результатами многочисленных исследований колонн большого диаметра.

Гидравлическое сопротивление провальной тарелки для рабочего диапазона скоростей газа от 0,4 до 0,6 м/с, соответствующего барботажному режиму работы может быть рассчитано по следующему уравнению:

$$\Delta P_{г-ж}^T = \Delta P_{сух} [1 + 148(\delta/d_э)^{1,5} (L/G)^{0,52} (\gamma_г/\gamma_ж)^{0,26}], \text{ Па} \quad (5)$$

где δ_t - толщина тарелки, м; G – нагрузка по газу кг/м² час.

Экспериментальная кривая 2 соответствует зависимости гидравлического сопротивления от скорости газа провальной тарелки со слоем мелкопризматической насадки. В результате визуальных наблюдений и из графика следует, что при низких скоростях от 0,2 до 0,4 м/с комбинированная тарелка работает в режиме смачивания, а гидравлическое сопротивление монотонно возрастает пропорционально квадрату скорости газа. Этот режим заканчивается точкой торможения, характерной для провальных тарелок, когда наблюдается задержка жидкости в отверстиях на тарелке. На этой кривой положение точки выражено не четко, из-за сглаживания общего сопротивления за счет слоя насадки. После этого при скоростях газа от 0,4 до 0,5 м/с взаимодействие между фазами вначале осуществляется на поверхности пленки и струй жидкости, а затем плавно переходит в барботажный режим. Сопротивление тарелки при этом резко увеличивается, а слой насадки остается неподвижным. При дальнейшем увеличении скорости газа, за счет интенсивного барботажа и увеличивающегося слоя жидкости между тарелками, наблюдается перемещение насадки, имеющее внешнее сходство с “ кипящим слоем”. Гидравлическое сопротивление возрастает менее интенсивно. После

точки аэрации (инверсии) слив жидкости с тарелки полностью прекращается и наступает “захлебывание”.

Следует отметить, что предельно допустимая скорость газа в комбинированном контактном устройстве несколько выше, чем в насадочных колоннах, но меньше, чем в провальных тарелках.

Общее гидравлическое сопротивление комбинированной тарелки до 1,5 раз выше чем провальных тарелок и может быть рассчитано как сумма сопротивлений провальных тарелок и слоя насадки:

$$\Delta P_{\Gamma-ж} = \Delta P_{\Gamma-ж}^T + \Delta P_{\Gamma-ж}^H, \text{ Па}$$

(6)

Для расчета и определения зависимости сопротивления орошаемой насадки $\Delta P_{\Gamma-ж}^H$ скорости газа в пределах до 0,5 м/с произведено графическое вычитание от данных соответствующих кривой 2 (рис. 2) данных, соответствующих кривой, а сопротивление орошаемой насадки может быть рассчитано по уравнению:

$$\Delta P_{\Gamma-ж}^H = \Delta P_c^H [1 + 7,9(L/G)^{0,41} (\gamma_{\Gamma}/\gamma_{ж})^{0,725} (M_{ж}/M_{\Gamma})^{0,045}], \text{ Па}$$

(7)

Где ΔP_c^H – гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па

С целью корреляции экспериментальных и расчетных данных для различных скоростей газа было рассчитано гидравлическое сопротивление по уравнениям (5) и (7), а так же общее гидравлическое сопротивление гидравлической тарелки по равенству (6). Например, при скорости газа

$\omega = 0,5$ м/с, сопротивление орошаемой провальной тарелки $\Delta P_{\Gamma-ж}^T = 250$ Па, сопротивление слоя насадки $\Delta P_{\Gamma-ж}^H = 120$ Па, и общее $\Delta P_{\Gamma-ж} = 370$ Па.

Сравнивая эти значения с соответствующими значениями экспериментальных данных при той же скорости по рис. 2 ($\Delta P_{\Gamma-ж}^T = 260$ Па, $\Delta P_{\Gamma-ж}^H = 135$ Па и общем $\Delta P_{\Gamma-ж} = 395$ Па.), можно заключить, что точность предложенных уравнений находится в пределах допустимой для подобного вида исследований.

Известно, что на основании теории вихревого движения можно принять, что в сравнимых точках турбулентного потока возникают вихри равной величины с одинаковыми скоростями циркуляции. Поскольку массообмен происходит на свободных поверхностях фаз и допускается турбулентная природа обмена, то перепад давления в двухфазной системе, который характеризует интенсивность образования вихрей, должен быть взят с учетом лишь той энергии, которая затрачивается на взаимодействие между потоками. Эта разница пропорциональна разнице сопротивлений двухфазного и однофазного потоков при одной и той же скорости однофазного потока.

Поэтому по величине межфазного трения $\Delta P_{тр}$ косвенно можно судить о разделяющей способности контактных устройств. Величина для провальной тарелки, провальной тарелки со слоем насадки и только насадки представлены на рис. 2 соответственно кривыми 4, 5, 6. В рабочем диапазоне скоростей для комбинированной тарелки в 1,5 раза выше чем $\Delta P_{тр}$ для провальных тарелок и до 3,5 раз выше чем $\Delta P_{тр}$ слоя мелкопризматической насадки высотой 30 мм. Следует отметить, что величина $\Delta P_{тр}$ для комбинированной тарелки растет с увеличением нагрузки по взаимодействующим фазам и слоя насадки. Одновременно увеличивается общее гидравлическое сопротивление, а производительность уменьшается.

На основании аналогии межфазного трения и тепломассообмена в ректификационных колоннах можно ожидать, что разделяющая способность (эффективность) провальных тарелок со слоем мелкой спиральной насадки будет выше разделяющей способности провальной тарелки без насадки. Очевидно, что насадка изменяет гидродинамическую обстановку и способствует развитию межфазной поверхности в комбинированном устройстве.

*RESEARCH OF HYDRODYNAMICS OF THE COMBINED PLATES OF
RECTIFYING COLUMNS*

V.N. MAMIN

Results of experimental studies of hydrodynamics of the combined failure plates with a nozzle are given in article. The calculated equations for determination of hydraulic resistance of plates were received.

Key words: column, hydrodynamics, failure plate, nozzle, resistance, equations.