

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

К. т. н. Башаров М. М.¹,
д. т. н., проф. Лаптев А. Г.²
(ОАО «ТАНЕКО», ФГБОУ ВПО
«КГЭУ»)

АННОТАЦИЯ. Рассмотрены подходы и представлены выражения для расчета энергоэффективности насадок теплообменных аппаратов. Даны результаты расчетов регулярных и нерегулярных насадок массообменных колонн и градирен. Сделаны выводы о наиболее эффективных и надежных конструкциях и режимах эксплуатации аппаратов. Отмечены области внедрений контактных насадок «Инжехим» на предприятиях нефтегазохимического комплекса и энергетики РФ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергоэффективность, теплообмен, насадки, энергетические коэффициенты, градирни, колонные аппараты.

Для решения задач повышения энергоэффективности и надежности промышленных теплообменных аппаратов применяются известные методы оптимизации с использованием критериев оптимальности. В качестве критериев могут быть различные к.п.д. и энергетические комплексы и коэффициенты. К таким к.п.д. относятся: тепловой и энергетический к.п.д., термический цикла Карно, относительный к.п.д. теплоэнергетической установки, утилизаторов теплоты — эффективности теплообмена, предложенный Кейсом и Лондоном, коэффициент использования теплоносителя и др.

Важным критерием оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов служит энергоемкость выпускаемой продукции, т. е. отношение потребляемых топливно-энергетических ресурсов (приведенных к условному топливу) к количеству выпускаемой продукции. Естественно, что использование любых критериев энергоэффективности имеет смысл, если промышленная установка (производство) обеспечивает требуемое качество выпускаемой продукции в заданном интервале нагрузок по исходному сырью.

В статье для выбора энергоэффективных и энергосберегающих научно-технических решений по модерни-

зации теплообменных аппаратов используются энергетические коэффициенты Кирпичева и Ануфьева и факторы интенсивности теплообмена. Конечной целью является повышение надежности аппаратов и снижение энергозатрат на единицу выпускаемой продукции в топливно-энергетическом комплексе и других отраслях промышленности.

Теплообменные контактные насадки

Одним из приоритетных направлений по повышению эффективности процессов и энергосберегающей модернизации теплообменных аппаратов является разработка и внедрение новых регулярных и нерегулярных контактных насадок.

Наиболее широкое применение получили следующие теплообменные нерегулярные и регулярные контактные устройства: насадки «Инжехим» (рис. 1), керамические и стальные кольца Рашига, стальные кольца Палля, кольца ZulzerC-RingNo.2.5, регулярная насадка Mellapak фирмы «ZulzerChemtech» 125Y, регулярная рулонная насадка «Инжехим»; спиральная насадка с косым гофром, насадка «зиг-заг» и плоскопараллельная насадка [1, 2].

Отечественная нерегулярная насадка «Инжехим» (рис. 1) и ее аналоги являются современной альтернативой кольцам Палля, Рашига и другим зарубежным насадкам. При равной высоте слоя они обеспечивают большую производительность, меньшее удельное гидравлическое сопротивление и повышенное качество разделения смесей.

У регулярной рулонной гофрированной насадки «Инжехим» (рис. 1) гофры смежных листов расположены перекрестно по отношению друг к другу и образуют каналы для потока паровой фазы с интенсивной турбулентностью. Нерегулярные и регулярные насадки выполняются с элементами шероховатости, что повышает коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Насадки «Инжехим» технологичны в изготовлении и монтаже в колонну.

Ниже рассмотрены сравнительные характеристики различных насадочных контактных устройств. Приве-

¹ 423570, РТ, Нижнекамск, а/я 97 РУПС

² 420066, РТ, Казань, Красносельская, 51

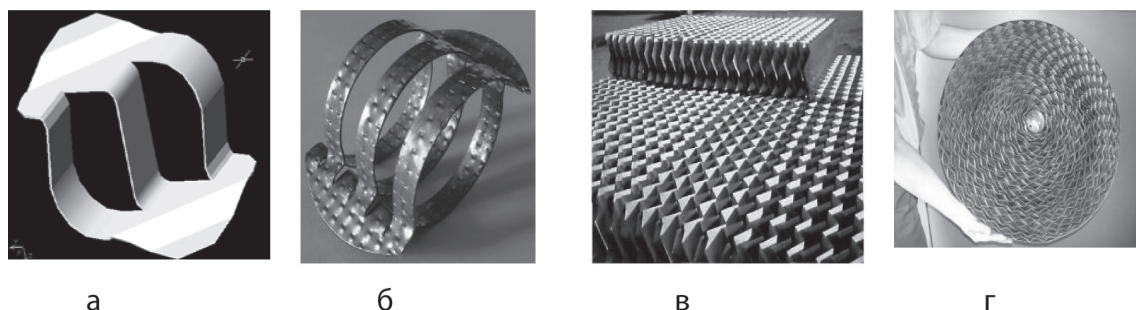


Рис. 1. Насадки: а — «Инжехим»; б — «Инжехим» с шероховатой поверхностью; в — регулярная блочная и г — регулярная рулонная гофрированная насадка «Инжехим» [1].

дены данные по энергетическому комплексу и сделаны выводы для нерегулярных и регулярных теплообменных насадок.

Расчет коэффициентов тепло- и массоотдачи выполнялся по уравнениям математических моделей для соответствующих конструкций регулярных и нерегулярных насадок [3–5]. Для расчета гидравлического сопротивления использовались как эмпирические выражения, так и экспериментальные данные [1, 2].

Рассмотрены следующие массообменные нерегулярные и регулярные контактные устройства: насадка «Инжехим», стальные кольца Рашига 50×50, кольца SulzerC-RingNo.2.5, стальные кольца Палля 50×50, регулярная насадка Mellapak фирмы «Sulzer Chemtech» 125Y, регулярная рулонная насадка «Инжехим» и другие типы.

Инженерно-внедренческий центр «Инжехим» разработал регулярную сегментную регулярную насадку, изготавливаемую в виде набора кольцевых сегментных блоков, которые при сборке плотно заполняют весь рабочий объем колонны. Каждый сегментный блок выполнен в виде пакета из гофрированных листов с перекрестным расположением гофров в смежных листах.

Нерегулярная насадка «Инжехим» (рис. 1) образована изогнутыми полосами, смещенными относительно друг друга. Края насадки изогнуты для исключения плотного прилегания отдельных элементов друг к другу. Жидкость, омывающая элементы насадки, сходит с них преимущественно в виде пленки. Это происходит за счет того, что геометрия насадки имеет гладкий гидравлический профиль и не содержит ломаных поверхностей и торчащих деталей, которые могли бы быть центром образования отдельных капель и струй. Пленочный характер стока жидкости с элементов насадки обеспечивает высокие массообменные характеристики насадки при минимальном значении уноса и способствует снижению гидравлического сопротивления. Несложная конструкция насадки позволяет изготавливать ее методом листовой штамповки, что снижает себестоимость ее изготовления [1].

У регулярной рулонной гофрированной насадки «Инжехим» (рис. 1) гофры смежных листов расположены перекрестно по отношению друг к другу и образуют каналы для потока паровой фазы с интенсивной турбулентностью. Кроме того, насадка выполняется с элементами шероховатости, что повышает коэффици-

ент массоотдачи в жидкой фазе. Насадка обладает высокой разделяющей способностью при низком гидравлическом сопротивлении.

Энергетическая эффективность

Академик М. В. Кирпичев предложил для оценки эффективности поверхности теплообмена использовать энергетический коэффициент E , равный отношению количества тепла Q , отданного поверхностью, к мощности N , затраченной на перекачивание теплоносителя относительно поверхности:

$$E = \frac{Q}{N}. \quad (1)$$

Коэффициент E характеризует степень использования работы, затраченной на передачу тепла, или теплогидродинамическое совершенство организации процесса теплообмена около некоторой поверхности.

Аналогично может быть записано выражение для оценки энергоэффективности массообмена:

$$E = \frac{M}{N}. \quad (2)$$

Количество переданного вещества из одной фазы в другую:

$$M = K_{oy} F \overline{\Delta y}, \quad (3)$$

где K_{oy} — коэффициент массопередачи, м/с; F — поверхность массообмена, м²; $\overline{\Delta y}$ — средняя движущая сила массопередачи (разность рабочей и равновесной концентраций распределяемого компонента); y — концентрация компонента.

Энергия, необходимая для подачи газа в массообменную колонну:

$$N = \Delta p V_r = \Delta p G / \rho_r, \quad (4)$$

где Δp — перепад давления, Па; V_r — объемный расход газа в секции колонны, м³/с; G — массовый расход, кг/с; ρ_r — плотность газа, кг/м³.

С использованием выражений (3) и (4) уравнение (2) примет вид:

$$E = \frac{K_{oy} F \overline{\Delta y} \rho_r}{\Delta p G}. \quad (5)$$

Выражение энергетического коэффициента можно также записать в виде отношения коэффициента теплоотдачи к единице поверхности (коэффициент Ануфьева В. И.), т. е. исключается влияние величины температурного напора:

$$E' = \frac{\alpha}{N/F}, \tag{6}$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F — поверхность теплообмена, м².

Для процесса массопередачи это выражение запишется в виде

$$E' = \frac{K_{oy}}{N/F}. \tag{7}$$

Поверхность контакта фаз в насадочной колонне равна:

$$F = SHa_v \psi_w, \tag{8}$$

где S — площадь поперечного сечения аппарата, м²; H — высота слоя насадки, м; a_v — удельная поверхность насадки, м²/м³; ψ_w — коэффициент смачиваемости поверхности насадки.

Подставим значение N (4) и F (8) в (7) получим:

$$E' = \frac{K_{oy} SHa_v \psi_w \rho_{\Gamma}}{\Delta p G}. \tag{9}$$

В теории массопередачи комплекс

$$h_{oy} = \frac{G}{K_{oy} Sa_v \psi_w \rho_{\Gamma}} \tag{10}$$

называют высотой единицы переноса, м.

Тогда выражение (9) удобнее записать в виде:

$$E' = \frac{\Delta p h_{oy}}{H} \tag{11}$$

Коэффициент E характеризует энергозатраты и массообменную эффективность контактных устройств. Чем меньше гидравлическое сопротивление (отнесенное к H) и больше коэффициент массопередачи (т. е. ниже значение h_{oy}), тем меньше коэффициент E' и, следовательно, эффективнее насадка.

Комплекс, аналогичный (9), можно записать и для теплогидравлической эффективности насадок:

$$E_T = \frac{K_T SHa_v \psi_w \rho_{\Gamma}}{\Delta p G}, \tag{12}$$

где K_T — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

Например, комплекс (12), можно использовать для оценки теплогидравлической эффективности гради-рен или насадочных колонн охлаждения газов и жидкостей.

Ниже рассмотрены следующие массообменные нерегулярные и регулярные контактные устройства: насадка «Инжехим» [1], стальные кольца Рашига

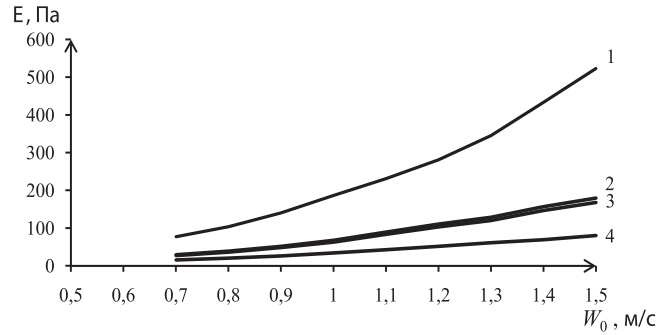


Рис. 2. Зависимость коэффициента E' (11) от скорости газа при плотности орошения $q = 40$ (м³/м²·ч) и эквивалентном диаметре $d_{\text{э}} = 0,03$ м, абсорбция аммиака водой: 1 — стальные кольца Рашига 50×50; 2 — кольца ZulzerC-RingNo.2.5; 3 — стальные кольца Палля 50×50; 4 — насадка «Инжехим»

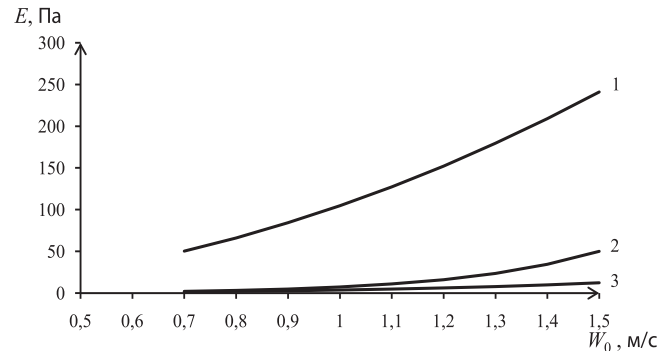


Рис. 3. Зависимость коэффициента E' (11) от скорости газа, при плотности орошения 10 (м³/м²·ч), абсорбция аммиака водой: 1 — стальные кольца Рашига 50×50; 2 — регулярная насадка Mellapak фирмы «Zulzer Chemtech» 125Y; 3 — регулярная рулонная насадка «Инжехим».

50×50, стальные кольца Палля 50×50, кольца ZulzerC-RingNo.2.5 [2], стальные кольца Рашига 50×50, регулярная насадка Mellapak фирмы «Zulzer Chemtech» 125Y, регулярная рулонная насадка «Инжехим» [1].

На рис. 2 представлено сравнение нерегулярных насадок по значению коэффициента E' . Видно, что наиболее эффективной нерегулярной насадкой является насадка «Инжехим» (кривая 4).

На рис. 3 представлено сравнение регулярных насадок по значению коэффициента E' (11). Наиболее эффективной является регулярная рулонная насадка «Инжехим» (кривая 3).

Таким образом, для совместной оценки гидродинамических и массообменных характеристик контактных устройств могут использоваться энергетические коэффициенты:

$$E'_{(max)} = \frac{M}{N}, \text{ или } E'_{(min)} = \frac{\Delta p \cdot h_{oy}}{H} \tag{13}$$

Выражение для $E'_{(max)}$ (13) можно также использовать и для оценки энергетической эффективности тарельчатых колонн.

Комплекс $E'_{(min)}$ (13) характеризует энергозатраты и

массообменную эффективность контактных устройств насадочного типа.

Рассмотрим частный случай — модель идеального вытеснения потоков в насадочном слое. В таком случае записывают M в виде (3) и $M = G(y_n - y_k)$. Из равенства потоков массы и с использованием выражения поверхности F насадки через удельную поверхность (8) находят высоту насадочного слоя

$$H = h_{oy} n_{oy}, \quad (14)$$

где $n_{oy} = (y_n - y_k) / \Delta y$ — число единиц переноса.

Реальная высота слоя H всегда больше значения (14) на 20–40% и более из-за перемешивания потоков.

Из (13) и (14) запишем энергетический коэффициент для модели идеального вытеснения

$$E_{(min)} = \frac{\Delta p}{n_{oy}} \quad (15)$$

Этим выражением можно пользоваться, если число Пекле структуры потоков > 20 , что для промышленных колонн на практике бывает довольно редко.

Если число единицы переноса записать в известной форме, используя коэффициент массопередачи, то получим

$$n_{oy} = \frac{K_{oy} F}{G / \rho_{\Gamma}} \quad (16)$$

и тогда выражение (15) с n_{oy} (16) примет исходную формулу (9).

Таким образом, рассмотренный подход вычисления энергетического коэффициента для насадочных колонн не учитывает реальную структуру потоков в аппарате. Этот учет можно выполнить лишь косвенным путем за счет изменения движущей силы массопередачи или коэффициента массопередачи, что является довольно сложной задачей. В таком случае коэффициенты Кирпичева (1), (2) являются более объективной характеристикой энергоэффективности. Поэтому представляется целесообразным в выражении для E (11) заменить высоту единицы переноса h_{oy} на высоту эквивалентную одной теоретической тарелки (ступени) — ВЭТТ (м). Известно, что чем меньше значение ВЭТТ (м), тем эффективнее работает насадочная колонна, т. е. обеспечивается большее число теоретических тарелок на высоту слоя.

Тогда запишем

$$E_{(min)} = \Delta p(\text{ВЭТТ}) / H \quad (17)$$

Значение ВЭТТ зависит как от коэффициента массопередачи, поверхности контакта фаз, так и от структуры потоков газа и жидкости в насадочном слое. Для расчета ВЭТТ известных и исследованных типов насадок используются обобщения экспериментальных данных или численные исследования и полученные на их основе расчетные зависимости [3–5].

На рис. 4 представлены зависимости энергетического коэффициента (17) при ректификации смеси

этанол-метанол в колонне с нерегулярными насадками «Инжехим» и кольцами Палля с номинальным размером 50 мм. Насадка «Инжехим» эффективнее в два-три и более раз при повышении фактора скорости.

Для оценки интенсивности массообменных аппаратов также используется фактор

$$i = \frac{M}{V} = \frac{K_{oy} F \Delta y}{V}, \quad (18)$$

где V — рабочий объем аппарата, м³.

Аналогично для теплообменных процессов:

$$i = \frac{Q}{V} = \frac{K_T F \Delta T}{V}, \quad (19)$$

Если в выражениях (18) и (19) исключить влияние движущих сил Δy и ΔT , то получим объемные коэффициенты массо- и теплопередачи:

$$K_{oy} a = K_{oy} F / V, \quad K_T a = K_T F / V. \quad (20)$$

По значению коэффициентов (20) также можно оценивать интенсивность массообменных и теплообменных процессов. В энергетике широкое применение получили противоточные градирни. В результате расчетов [6] градирен при скорости воздуха 1,35 м/с и плотности орошения 8,95 м³/(м²·ч) получены значения объемного коэффициента массоотдачи.

Рассмотрены различные типы блоков регулярных насадок: гофрированные полиэтиленовые трубы: $\beta a = 0,23, \text{ с}^{-1}$; деревянные прямоугольные бруски, поставленные на ребро $\beta a = 0,647, \text{ с}^{-1}$; полиэтиленовые сетчатые трубки $\beta a = 0,55, \text{ с}^{-1}$; волнистые асбестоцементные листы $\beta a = 0,55, \text{ с}^{-1}$; полиэтиленовые гофрированные листы $\beta a = 0,81, \text{ с}^{-1}$.

Из расчетов следует, что наиболее эффективными являются асбестоцементные листы и деревянные прямоугольные бруски, однако асбест и дерево более подвержены биообрастанию и быстрому разрушению.

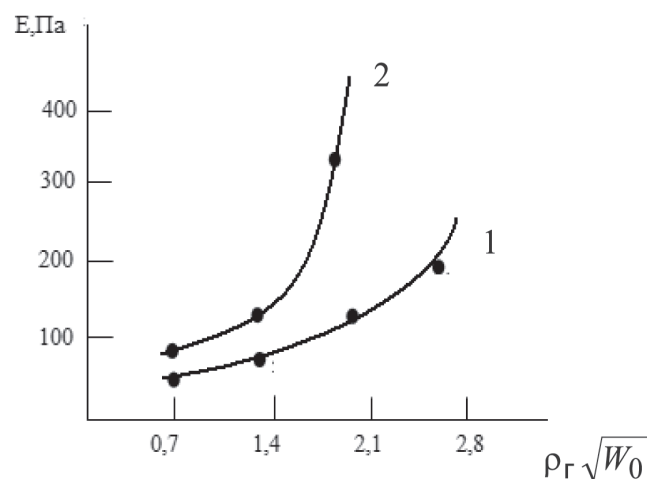


Рис. 4. Зависимость $E_{(min)}$ (17) от фактора скорости. 1 — нерегулярная насадка «Инжехим», 2 — кольца Палля. Смесь этанол-метанол.

Поэтому наиболее надежными и эффективными являются полиэтиленовые гофрированные листы. Отсюда следует вывод, что при использовании любых методов оценки эффективности тепломассообменных процессов и надежности контактных устройств необходимо также проводить тщательное технико-экономическое обоснование.

Выводы

Рассмотрен метод оценки совместных тепломассообменных и энергетических характеристик контактных устройств. Метод применяется авторами при выборе научно-технических решений при модернизации промышленных аппаратов.

Насадки «Инжехим» внедрены в нескольких десятках тепломассообменных аппаратах и газосепараторах на различных предприятиях нефтегазохимического комплекса и энергетики РФ. Например, за последние несколько лет: ректификационная колонна выделения фенола (2007 г.); две ректификационные колонны выделения гексена (2008 г.); пять ректификационных и две абсорбционные колонны получения формальдегида и изопрена-мономера (2006–2009 гг.); две абсорбционные колонны в производстве бутилкаучука (2008 г.); три колонны водной отмывки и охлаждения пирогаза (2008 г.); колонны получения товарного диоксида

углерода (2007–2008 гг.); четыре ректификационные колонны разделения этаноламинов (2006 г.); установки для очистки углеводородных газов от серы (2012 г.); газосепараторы и отстойники в производстве этилена (более 15 аппаратов) (2007–2008 г.); термический деаэрактор Казанской ТЭЦ-3 (2012 г.); газосепараторы очистки природного газа (2008–2013 гг.).

Статья выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности. Заявка №13.405.2014/К.

Литература

1. Каган А. М., Лаптев А. Г., Пушнов А. С. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов. Казань: Отечество, 2013.
2. Сокол Б. А., Чернышов А. К., Баранов Д. А. и др. Насадки массообменных колонн. М.: ЗАО «Инфохим», 2009.
3. Лаптев А. Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007.
4. Олевский В. М. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура. М.: Химия, 1988.
5. Лаптев А. Г., Николаев Н. А., Башаров М. М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. М.: Теплотехник, 2011.
6. Лаптев А. Г., Ведьгаева И. А. Устройство и расчет промышленных градилен. Казань: Казанск. гос. энерг. ун-т, 2004.

