

УДК 62–94

Исследование абсорбционного осушения воздуха в циклонно-пенном аппарате

Канд. техн. наук В. В. КИСС¹, канд. техн. наук А. А. ЕВДОКИМОВ²

¹vkiss@yandex.ru, ²evdokimov@bk.ru

Университет ИТМО

Канд. техн. наук Т. Т. КАВЕРЗНЕВА³, канд. техн. наук Н. В. РУМЯНЦЕВА⁴

³kaverztt@mail.ru, ⁴rumyantseva_nina@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Представлены результаты исследования влияния режимных параметров процесса абсорбции водяных паров при осушении воздуха в контактном аппарате циклонно-пенного типа на эффективность процесса. Эффективность процесса определялась как с использованием коэффициента извлечения, так и коэффициента общей эффективности по Мерффри. В результате установлено, что на эффективность процесса абсорбции оказывают влияние основные гидродинамические характеристики: скорость движения воздуха, высота слоя динамической пены, число единиц переноса, а также воздействие продольного перемешивания. Предложено оценивать общую эффективность процесса с учетом не только степени извлечения, но и с учетом энергетических характеристик (гидравлическое сопротивление), массогабаритных характеристик и величины каплеуноса. Выявлено, что оптимальным режимом работы циклонно-пенного аппарата при абсорбции водяных паров влагопоглощающими растворами является режим, осуществляемый при скорости газа 5 м/с и высоте слоя динамической пены 0,3 м. Введение для суммарной оценки условного коэффициента эффективности позволяет производить сравнение, как контактных аппаратов, так и абсорбентов.

Ключевые слова: осушение воздуха, абсорбция, циклонно-пенный аппарат, эффективность, коэффициент эффективности.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 25.04.2018, принята к печати 20.07.2018

DOI: 10.17586 / 1606-4313-2018-17-3-22-28

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Kiss V. V., Evdokimov A. A., Kaverzneva T. T., Rumyantseva N. V. Исследование абсорбционного осушения воздуха в циклонно-пенном аппарате // Вестник Международной академии холода. 2018. № 3. С. 22–28.

Absorption air dehumidification in cyclone-foaming apparatus

Ph. D. V. V. KISS¹, Ph. D. A. A. EVDOKIMOV²

¹vkiss@yandex.ru, ²evdokimov@bk.ru

ITMO University

Ph. D. T. T. KAVERZNEVA³, Ph. D. N. V. RUMYANTSEVA⁴

³kaverztt@mail.ru, ⁴rumyantseva_nina@mail.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

The article deals with the results of the experiment concerning the influence of operating conditions for vapor absorption process during air dehumidification in contact cyclone-foaming apparatus on the efficiency of the process. The efficiency was determined by both recovery coefficient and Murphree overall efficiency coefficient. It was discovered that the absorption is influenced by main hydrodynamic characteristics: air velocity, dynamic foam bed depth, the number of transfer units, and the influence of longitudinal mixing. It is suggested to evaluate general efficiency of the process taking into account on only recovery ratio, but also energy characteristics (hydraulic resistance), mass-dimensional characteristics, and the value of drop entrainment. Optimum operating conditions for cyclone-foaming apparatus during vapor absorption by dehumidifying solution are shown to be gas velocity of 5 m/s and dynamic foam bed depth of 0.3 m. The introduction of conditional efficiency coefficient allows comparing both contact apparatus and absorbents.

Keywords: air dehumidification, absorption, cyclone-foaming apparatus, efficiency, efficiency coefficient

Article info:

Received 25/04/2018, accepted 20/07/2018

DOI: 10.17586 / 1606-4313-2018-17-3-22-28

Article in Russian

For citation:

Kiss V. V., Evdokimov A. A., Kaverzneva T. T., Rumyantseva N. V. Absorption air dehumidification in cyclone-foaming apparatus. Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda. 2018. No 3. p. 22–28.

Введение

В состав систем как комфортного, так и технологического кондиционирования воздуха, как правило, входят блоки осушения [1, 2]. При этом наиболее широко применяют воздухоосушители, действие которых основано на применении различных сорбентов [3]. Выбор сорбента зависит, прежде всего, от требований по глубине осушения. Кроме этого необходимо учитывать энергетическую эффективность процесса, массогабаритные характеристики осушителя и ряд других факторов.

Данная работа посвящена исследованию процесса осушения воздуха с использованием жидких сорбентов. Эффективность процессов абсорбции в значительной степени зависит от контактного аппарата, в котором этот процесс осуществляется.

Объекты и методы исследования

В качестве контактного аппарата выбран циклонно-пенный аппарат, в котором реализуется режим динамической пены. Аппараты данного типа доказали свою высокую эффективность при проведении тепло- и массообменных процессов [4–6].

Для выявления оптимальных режимов работы циклонно-пенного аппарата было проведено исследование влияния различных параметров процесса на эффективность абсорбции.

В процессе исследований измерялись следующие основные параметры: скорость воздуха и его расход, расход абсорбентов, температуры воздуха и абсорбентов, влагосодержание воздуха, концентрации абсорбентов, высота слоя динамической пены.

Расход воздуха определялся по скорости его протекания в воздуховодах. Соотношение между скоростью воздуха и давлением, которое создает движущийся воздух, имеет вид:

$$v = \sqrt{\frac{2gP_{\text{дин}}}{\rho_{\text{в}}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{дин}}$ — динамический напор, Па; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг/м³; g — ускорение свободного падения

Для измерения динамического напора использовалась оттарированная пневмометрическая трубка Прандтля ($k_{\text{тр}} = 1,02$) и микроанометр типа ММН ($k_{\text{м}} = 0,99$).

Действительный динамический напор в выбранной точке воздуховода определялся из выражения:

$$P_{\text{дин}} = 0,8095l \sin \beta \rho_{\text{сп}} k_{\text{тр}} k_{\text{м}} g, \quad (2)$$

где l — показания микроанометра, м; β — угол наклона капилляра микроанометра.

Измерение скорости осуществлялось на прямом участке воздуховода длиной 2 м и с диаметром 0,094 м.

Для получения достоверных данных по величине скорости воздуха были произведены измерения скоростей в четырех сечениях с равновеликими площадями, при различных расходах воздуха. На основании проведенных тарировочных испытаний было установлено, что профили скоростей на различных режимах подобны. Это позволило принять коэффициент распределения

скоростей постоянным для всех режимов и равным $\alpha_{\text{ср}} = 0,835$.

Расход воздуха рассчитывался по формуле

$$V_{\text{г}} = v_0 \alpha_{\text{ср}} S, \quad (3)$$

где v_0 — скорость воздуха на оси воздуховода, м/с; S — площадь сечения воздуховода, м².

Измерение расхода жидкости осуществлялось ротаметрами типа РС-3 со стальными поплавками. Ротаметры тарировались для воды и растворов абсорбентов. Измерение температур воздуха и абсорбентов производились ртутными лабораторными термометрами с ценой деления 0,1 °С. Определение концентраций абсорбентов осуществлялось на основании имеющихся зависимостей плотности растворов от температуры при различных концентрациях.

Измерение влагосодержания воздуха на входе и выходе из аппарата осуществлялось с помощью психрометров Ассмана конструкции НИИОГАЗ. Данные психрометры разработаны специально для измерения влагосодержания в газах. При проведении замеров руководствовались рекомендациями разработчика и предлагаемой методикой расчетов.

Измерение высоты слоя динамической пены в исследуемом аппарате наиболее целесообразно производить косвенным методом на основе известной зависимости высоты слоя от уровня жидкости в водомерной трубке и скорости газа [4]:

$$H_{\text{п}} = 1,38 h_{\text{ж}} v^{0,57}, \quad (4)$$

где $h_{\text{ж}}$ — высота уровня жидкости в водомерной трубке, м.

Эффективность работы абсорбционных аппаратов обычно характеризуют степенью извлечения компонента [7]. Достижимая степень извлечения зависит от технологического режима работы аппарата и от совершенства его конструкции [8–11]. Степень извлечения можно выразить посредством коэффициента извлечения, который представляет собой отношение количества фактически поглощенного компонента к количеству, которое было бы поглощено при наиболее полном извлечении:

$$\psi = \frac{C_0^{\text{г}} - C_1^{\text{г}}}{C_0^{\text{г}} - C_1^{\text{г}*}}, \quad (5)$$

где $C_0^{\text{г}}$ — начальная концентрация компонента в поступающем газе, кг/м³; $C_1^{\text{г}}$ — конечная концентрация компонента в поступающем газе, кг/м³; $C_1^{\text{г}*}$ — концентрация компонента в газе, равновесная с концентрацией поступающей жидкости, кг/м³.

Ряд авторов, в качестве характеристики эффективности массопередачи, используют коэффициент общей эффективности массопередачи по Мерффри [12]:

$$E = \frac{C_0^{\text{г}} - C_1^{\text{г}}}{C_0^{\text{г}} - C_0^{\text{г}*}}, \quad (6)$$

здесь $C_0^{\text{г}*}$ — концентрация компонента в газе, равновесная с концентрацией уходящей жидкости, кг/м³.

Из уравнений (1) и (2) следует, что значение коэффициента извлечения ψ определяет состав уходящего газа при начальной концентрации компонента в посту-

пающем газе C_0^r и поступающей жидкости C_1^j , а значение общей эффективности массопередачи E — при начальной концентрации компонента в поступающем газе C_0^r и уходящей жидкости C_0^j .

Уравнения (1) и (2) связаны между собой соотношением:

$$E = \frac{\Psi}{1 - \frac{\Psi}{A}}, \quad (7)$$

где A — абсорбционный фактор, $A = \frac{V_j}{V_r m_c}$; V_j — расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$; V_r — расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$; m_c — константа равновесия.

Оценка эффективности массопередачи с помощью коэффициента E удобна для прямолинейного движения фаз, т. к. в данном случае E определяет эффективность процесса как меру его приближения к теоретическому.

В остальных случаях величина E является условной характеристикой эффективности массопередачи.

Результаты измерений и их обсуждение

В качестве характеристики эффективности процесса абсорбции в циклонно-пенном аппарате представляется целесообразным использовать коэффициент извлечения ψ , который зависит от кинетической характеристики абсорбционного аппарата, выраженной числом единиц переноса $N_{ор}$.

Характер изменения величины коэффициента извлечения ψ , в зависимости от значения абсорбционного фактора A , при различных числах единиц переноса $N_{ор}$ показан на рис. 1.

Из диаграммы, показанной на рис. 1, следует, что коэффициент извлечения ψ возрастает с увеличением числа единиц переноса $N_{ор}$ и абсорбционного фактора A . При $A > 60$ достигаются предельные значения коэффициента извлечения для данных чисел единиц переноса. Поэтому, для достижения наиболее эффективной работы аппарата при заданном числе единиц переноса $N_{ор}$ значения абсорбционного фактора должны быть больше 60.

Степень извлечения зависит также от кинетики процесса, выражаемой числом единиц переноса $N_{ор}$ и от сте-

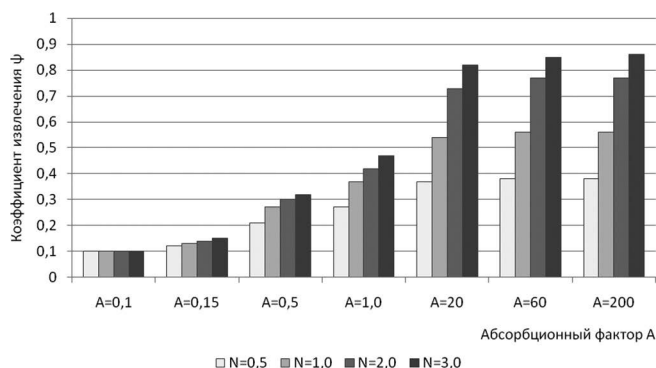


Рис. 1. Зависимость коэффициента извлечения ψ от абсорбционного фактора A при различных значениях числа единиц переноса $N_{ор}$

Fig. 1. The dependence of recovery coefficient ψ on absorption factor A at different numbers of transfer units $N_{ор}$

пени продольного перемешивания, характеризуемого критерием Пекле (Pe). Влияние этих параметров неравноценно при различных значениях абсорбционного фактора, поэтому представляется целесообразным рассмотреть зависимости при малых ($A=1$) и больших ($A=60$) значениях абсорбционного фактора, как это обычно и делается при аналогичных исследованиях.

На рис. 2. показана зависимость коэффициента извлечения от числа единиц переноса при различных значениях критерия Pe_r и при $A=1$.

Из графика, представленного на рис. 2, следует, что при абсорбции водяных паров в условиях малых значений абсорбционного фактора A , продольное перемешивание практически не влияет на величину коэффициента извлечения. Коэффициент извлечения возрастает с увеличением числа единиц переноса вплоть до $N_{ор}=2,0$. Дальнейшее увеличение интенсивности контакта весьма слабо влияет на величину коэффициента извлечения. Это объясняется тем, что в исследуемом аппарате раствор абсорбента движется по схеме идеального перемешивания и интенсивность процесса массопередачи, в первую очередь, обуславливается концентрацией компонента, равновесной с концентрацией уходящей жидкости. Уменьшение значения абсорбционного фактора A , соответствующего уменьшению плотности орошения, приводит к насыщению раствора и увеличению равновесной концентрации водяных паров над раствором по высоте аппарата, т. е. уменьшению движущей силы процесса. Поэтому, несмотря на увеличение интенсивности контакта, степень извлечения ψ при $N_{ор} > 2,0$ остается практически постоянной.

Коэффициент извлечения в данном случае характеризует в большей степени количественную сторону процесса или глубину осушения. Чем больше значение ψ , тем ближе значение концентрации компонента в уходящем газе приближается к равновесной концентрации над поступающим в аппарат раствором и теоретически равновесие при бесконечно большой поверхности соприкосновения может быть достигнуто только в противоточном аппарате.

При идеальном перемешивании жидкости, имеющем место в циклонно-пенном аппарате, равновесие между

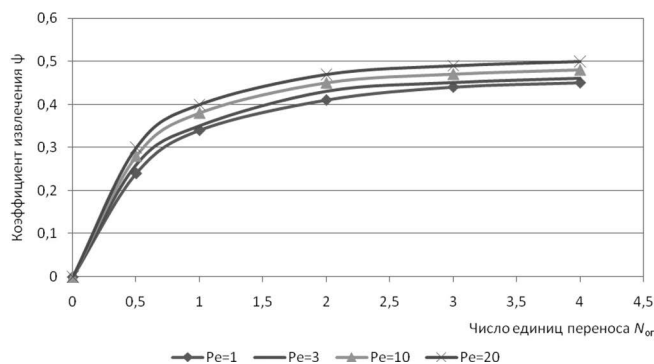


Рис. 2. Зависимость коэффициента извлечения ψ от числа единиц переноса $N_{ор}$ при различных значениях критерия Pe_r при $A=1$

Fig. 2. The dependence of recovery coefficient ψ on the number of transfer units $N_{ор}$ at different values of Pe_r criteria when $A=1$

фазами при бесконечно большой поверхности контакта фаз теоретически может быть достигнуто, только если концентрация водяных паров в уходящем газе будет равна их равновесной концентрации над уходящей жидкостью. Поэтому в данном случае, качественную сторону процесса массопередачи, т. е. степень его приближения к теоретически возможному, наиболее полно отражает коэффициент общей эффективности массопередачи по Мерффри E . По мере увеличения абсорбционного фактора A , различие в значениях коэффициента извлечения ψ и коэффициента общей эффективности массопередачи по Мерффри E сглаживается и при $A > 60$ они становятся практически равными. Поэтому использование этих коэффициентов для оценки эффективности процесса абсорбции водяных паров в циклонно-пенном аппарате при данных режимах работы одинаково правомерно.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициентов E и ψ от числа единиц переноса при различных значениях критерия Pe_r и при $A=60$.

Как видно из диаграммы, показанной на рис 3, значения коэффициентов E и ψ во всем диапазоне отличаются друг от друга примерно на 1%. Из этой диаграммы также следует, что продольное перемешивание сильно влияет на эффективность процесса массопередачи, особенно при больших значениях чисел единиц переноса ($N_{ог} > 1,0$). Это подтверждает необходимость учета продольного перемешивания в дисперсной фазе при расчете процессов абсорбции водяных паров в циклонно-пенном аппарате.

Кинетика процесса абсорбции, характеризующая числом единиц переноса, в значительной степени зависит от режима работы аппарата, а именно от скорости газа и высоты слоя динамической пены. Для установления оптимального режима процесса абсорбции представляется целесообразным рассмотреть непосредственное влияние указанных режимных параметров на величину коэффициента E .

Зависимость величины общей эффективности массопередачи E от скорости газа в аппарате при различных значениях высоты слоя пены H_n представлена на рис. 4.

Учитывая, что все зависимости процесса осушения от определяющих параметров для различных растворов

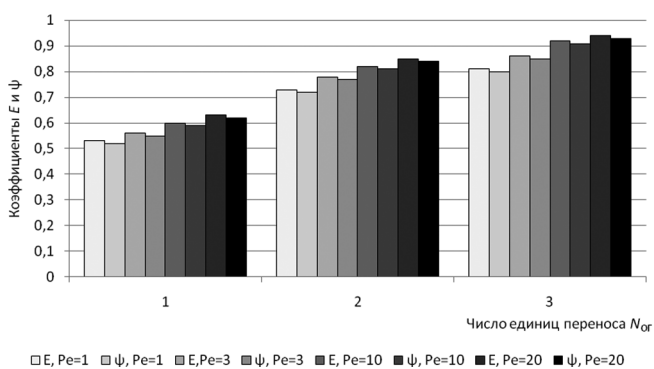


Рис. 3. Зависимость коэффициентов E и ψ от числа единиц переноса при различных значениях критерия Pe_r

Fig. 3. The dependence of E and ψ coefficients on the number of transfer units at different values of Pe_r criteria

носят аналогичный характер, для сокращения объема изложения на рис. 4 показана зависимость, полученная при обработке воздуха раствором LiCl. В дальнейшем, отдельные зависимости также приводятся для одного какого-либо из исследованных растворов.

Из данных рис. 4 следует, что зависимость общей эффективности процесса абсорбции от скорости воздуха имеет максимум. Причем с увеличением высоты пены точка максимума смещается вправо, т. е. достигается при более высоких скоростях газа в аппарате. Расчетом установлено, что максимальное значение коэффициента общей эффективности процесса массопередачи по Мерффри соответствует такому режиму работы циклонно-пенного аппарата, при котором газосодержание слоя динамической пены составляет 0,74.

Наличие максимума E объясняется характером изменения величины удельной поверхности контакта фаз, также имеющей наибольшее значение при $\phi_r=0,74$. При дальнейшем увеличении скорости воздуха в аппарате, эффективность абсорбции вначале уменьшается, а затем при скоростях $> 4,5$ м/с приобретает практически постоянное значение. При малых высотах газожидкостного слоя наблюдается даже незначительный рост E . Отсутствие влияния скорости газа на интенсивных режимах говорит о том, что внутренняя циркуляция в газовых пузырях достигает таких значений, что становится способной компенсировать уменьшение удельной поверхности контакта фаз и эффективность процесса определяется, в основном, временем контакта, т. е. высотой слоя динамической пены. При высоте слоя динамической пены $H_n < 0,1$ м, размеры пузырей достигают таких значений, при которых резко возрастает циркуляция и скорость переноса массы внутри пузыря. Этот факт, несмотря на уменьшение поверхности контакта фаз, приводит даже к некоторому увеличению значения E с ростом скорости газа.

В этой связи представляется целесообразным рассмотреть зависимость общей эффективности абсорбции по Мерффри от высоты слоя динамической пены, показанную на рис. 5.

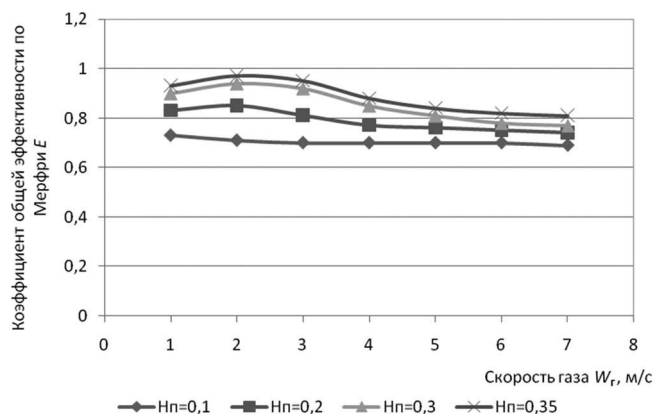


Рис. 4. Зависимость коэффициента общей эффективности массопередачи по Мерффри E от скорости газа W_r при различных значениях высоты слоя пены H_n

Fig. 4. The dependence of Murphree mass transfer overall efficiency coefficient E on gas velocity $f W_r$ or different values of foam bed depth H_n

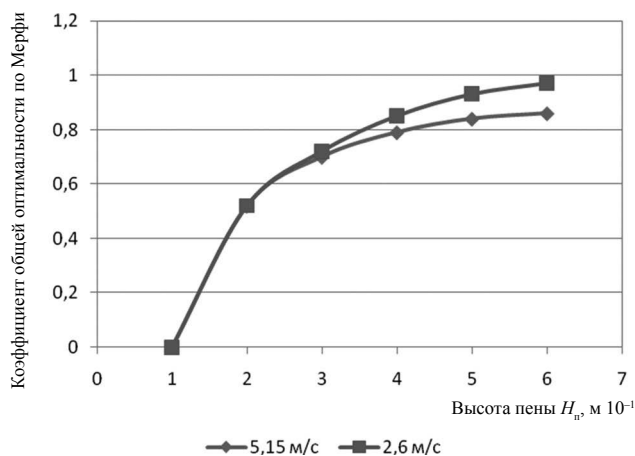


Рис. 5. Зависимость коэффициента общей эффективности массопередачи по Мерффи E от высоты пены H_n

Fig. 5. The dependence of Murphree mass transfer overall efficiency coefficient E on foam bed depth H_n

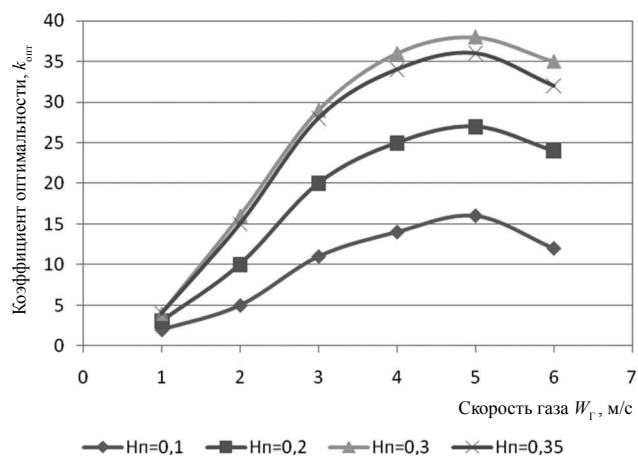


Рис. 6. Зависимость величины коэффициента оптимальности от скорости газа

и высоты слоя динамической пены для раствора LiBr

Fig. 6. The dependence of optimality coefficient on gas velocity and dynamic foam bed depth for LiBr solution

Из графика, представленного на рис. 5, следует, что с ростом высоты слоя динамической пены общая эффективность абсорбции возрастает.

Наиболее сильно влияние высоты пены наблюдается при $H_n < 0,3$ м. При дальнейшем увеличении высоты газообразного слоя его влияние на эффективность абсорбции ослабевает. Поэтому при осуществлении процесса абсорбции водяных паров из воздуха в циклонно-пенном аппарате нецелесообразно поддерживать высоту пены меньше 0,3 м. Значительное возрастание высоты динамической пены также нецелесообразно, т. к. увеличение последней на 0,1 м приводит к росту коэффициента эффективности примерно на 3%, а сопротивление аппарата при этом возрастает на 20%.

Таким образом, оптимальной высотой пены в циклонно-пенном аппарате можно считать $H_n = 0,3 \div 0,35$ м.

При этом, максимально возможная эффективность процесса массопередачи, в зависимости от высоты слоя динамической пены, достигается при скорости газа в рабочей зоне циклонно-пенного аппарата 1,5–2,7 м/с (рис. 6). Однако, при увеличении скорости газа, к примеру, до 5 м/с, величина общей эффективности процесса уменьшается на 10–12%. Габариты аппарата уменьшаются ~ в 2 раза. В то же время, как известно, при изменении скорости газа изменяется и гидравлическое сопротивление аппарата и, как следствие, изменяются энергетические показатели [13, 14]. Скорость газа и высота слоя динамической пены также влияют на величину каплеуноса [15]. Величина каплеуноса является важной характеристикой аппарата в связи с высокой коррозионной активностью абсорбентов.

Учет столь разнообразных факторов, влияющих на общую эффективность работы аппарата, целесообразно произвести с помощью условного коэффициента оптимальности [16], который можно представить в следующем виде:

$$k_{opt} = \frac{\Delta C}{S \cdot H_n \cdot \Delta P \cdot e}, \quad (8)$$

где ΔC — количество поглощенных водяных паров, кг/м³;

ΔP — сопротивление аппарата, Па;

e — количество унесенного раствора, кг/м³;

S — площадь аппарата, м²;

H_n — высота слоя пены, м.

На рис 6 представлена расчетная зависимость критерия оптимальности от скорости газа и высоты слоя динамической пены для случая поглощения водяных паров из воздуха раствором бромистого лития.

Зависимости для остальных исследованных растворов имеют аналогичный характер. Как видно из графика, показанного на рис 6, оптимальным значением скорости газа в циклонно-пенном аппарате является 5 м/с. Кроме того, рост критерия оптимальности наблюдается до значения высоты слоя динамической пены $H_n = 0,3$ м. При дальнейшем увеличении высоты слоя пены происходит уменьшение значения критерия оптимальности.

Таким образом, можно сделать вывод, что, несмотря на некоторое уменьшение эффективности процесса массопереноса, оптимальным режимом работы циклонно-пенного аппарата при абсорбции водяных паров влагопоглощающими растворами является режим, осуществляемый при скорости газа 5 м/с и высоте слоя динамической пены 0,3 м.

В циклонно-пенных аппаратах обеспечивается стабильная гидродинамическая обстановка, способствующая интенсивному протеканию процессов тепло- и массопередачи в широком диапазоне скоростей газа.

Коэффициент оптимальности может быть использован также для сравнительной оценки эффективности применения различных влагопоглощающих растворов. На рис. 7 представлена зависимость коэффициента оптимальности от скорости газа в аппарате для случая осушения воздуха четырьмя исследованными абсорбентами: хлористым кальцием, бромистым литием, холин-хлоридом и хлористым литием.

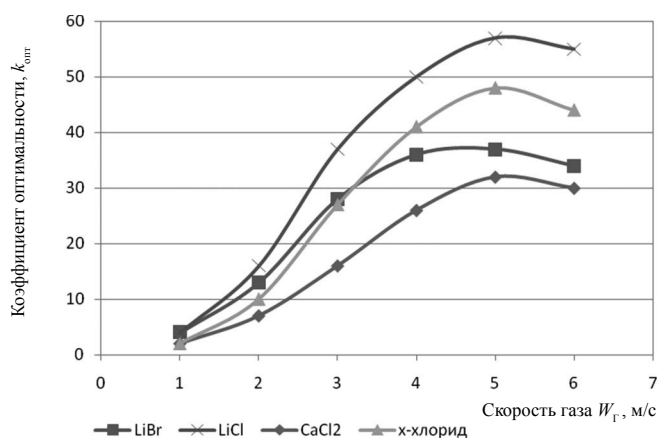


Рис. 7. Зависимость коэффициента оптимальности от скорости газа для различных абсорбентов

Fig. 7. The dependence of optimality coefficient on gas velocity for different absorbents

Выводы

Результаты проведенного исследования показали, что максимальному значению коэффициента оптимальности для всех четырех абсорбентов соответствует скорость газа 5 м/с. Несколько различный характер зависимостей объясняется отличиями в физических свойствах абсорбентов, от которых (в частности от вязкости) в силь-

ной степени зависит эффективность работы каплеуловителей. Наиболее эффективным для осуществления процесса осушения воздуха является раствор хлористого лития, далее следуют холин-хлорид, бромистый литий и хлористый кальций (см. рис. 7). По эффективности бромистый литий находится на третьем месте, хотя обладает самой высокой абсорбционной емкостью. Это объясняется, прежде всего, его высокой плотностью, что, соответственно, в сильной степени влияет на сопротивление газожидкостного слоя и на общую эффективность процесса.

По коэффициенту оптимальности раствор холин-хлорида лишь на 16% уступает раствору хлористого лития, однако, он почти в девять раз дешевле соли хлористого лития и практически не оказывает коррозионного воздействия на алюминий-магниевые сплавы.

Таким образом, при помощи коэффициента оптимальности, оценка общей эффективности процесса абсорбции производится с учетом не только коэффициента извлечения, но и с учетом таких важных характеристик, как гидравлическое сопротивление, размеры и, соответственно металлоемкость аппарата и каплеунос. Также коэффициент оптимальности позволяет проводить сравнение различных абсорбентов по их общей эффективности. Следовательно, при учете ряда факторов, влияющих на общую эффективность работы, и выборе оптимальных режимов работы, циклонно-пенные аппараты могут быть использованы при проведении тепло- и массообменных процессов в различных отраслях промышленности.

Литература

1. Цыганков А. В., Гримитлин А. М. Состояние и перспективы развития систем кондиционирования воздуха. // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. с. 47–50.
2. Сергунин А. С., Симаненков С. И., Гапачова Н. Ц. О глубокой осушке воздуха применительно к бортовым кислорододобывающим установкам. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. № 1 (17). с. 197–202.
3. Коченков Н. В. Использование в СКВ воздухоосушителей, основанных на применении сорбентов. // Вестник Международной академии холода. 2013. № 1. с. 51–56.
4. Богатых С. А. Циклонно-пенные аппараты. — Л.: Машиностроение, 1978. 223 с.
5. Кисс В. В., Радионова И. Е. Результаты экспериментальных исследований величины поверхности контакта фаз при интенсивном барботаже. // Национальная ассоциация ученых (НАУ). 2014. № 4. С. 33–36.
6. Кисс В. В. Теоретическое описание величины поверхности контакта фаз при интенсивном барботаже. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 2.
7. Рамм В. М. Абсорбция газов. — М.: Химия, 1976, 655 с.
8. Жуков В. П. Эволюция межфазной поверхности тепло-массообмена в барботируемом слое. // Вести ИГЭУ. 2012. № 4. с. 12–16.
9. Осипова Л. Э., Тепляков Э. Ш. Аминева Д. А., Матюшко Б. Н. Теоретическое исследование массоотдачи в много-

References

1. Tsygankov A. V., Grititlin A. M. Status and prospects of development of air-conditioning systems. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. No. 4. p. 47–50. (in Russian)
2. Sergunin S. A., Simanenkov S. I., Gatapova N. Ts. Deep drying of air in relation to the side kislorodozawisimam installations. *Bulletin of Tambov state technical University*. 2012. No. 1 (17). p. 197–202. (in Russian)
3. Kochenkov N. B. The use of sorbent-based dehumidifiers in air-conditioning systems. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. No 1. p. 51–56. (in Russian)
4. Bogatykh S. A. Cyclone-foam machines. L: Mashinostroenie, 1978. 223 p. (in Russian)
5. Kiss V. V., Radionova I. E. results of experimental studies of the size of the contact surface of phases in intensive bubbling. *National Association of scientists (NAU)*. 2014. No. 4. P. 33–36. (in Russian)
6. Kiss V. V. Theoretical description of the magnitude of the contact surface of phases in intensive bubbling. *Processes and Food Production Equipment*. 2014. No 2. (in Russian)
7. Ramm V. M. Adsorption of gases. Moscow: Chemistry, 1976, 655 p. (in Russian)
8. Zhukov V. P. Evolution of the interfacial surface of heat and mass transfer in the bubbled layer. *Vesti IGEU*. 2012. No. 4. p. 12–16. (in Russian)
9. Osipova L. E., Teplyakov E. Sh. Amineva D. A., Matyushko B. N. Theoretical study of mass transfer in multicomponent gas

- компонентных газовых смесях. // Вестник Казанского технологического университета. 2012. том 15. № 22. с. 9–14.
10. Андреев С. Ю., Давыдов Г. П., Петрунин А. А. и др. Математическое моделирование процессов массопередачи кислорода в жидкость и всплывающего пузырька воздуха. // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Том 1. с. 194–196.
 11. Солонова О. В., Муратова Е. И., Зюзина О. В. Оптимизация условий массообмена в биотехнологических системах. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Том 9. № 3. с. 390–392.
 12. Максименко Ю. Д. Эффективность массопередачи при ректификации многокомпонентных смесей. // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2004. № 1 (20). С. 225–230.
 13. Сидягин А. А., Степикин А. В., Балахнин И. А. Гидравлическое сопротивление блочной-модульной тепло-массообменной насадки. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. с. 176–183.
 14. Сорокопуд А. Ф., Стрижков Д. С., Козымаев В. С. Исследование работы нового контактного элемента роторного распылительного аппарата. // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 4 (27). с. 111–115.
 15. Исмагилов А. Т. Методы интенсификации эффективности улавливания аэрозолей в аппаратах ударно-инерционного действия. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2010. № 1. С. 32.
 16. Кисс В. В. Оценка эффективности процессов абсорбции в циклонно-пенном аппарате. Сборник трудов VII МНТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». — СПб.: Университет ИТМО, 2015, с. 43–45.
- mixtures. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. Vol. 15. No. 22. pp. 9–14. (in Russian)
10. Andreev S. Yu., Davydov G. P., Petrunin A. A. and others. Mathematical modeling of the processes of oxygen mass transfer into a liquid and a pop-up air bubble. *Proceedings of The international Symposium «Reliability and quality»*. 2013. Vol. 1. p. 194–196. (in Russian)
 11. Solonova O. V., Muratova E. I., Zyuzina O. V. Optimization of the conditions of mass transfer in biotechnology systems. *Bulletin of Tambov University. Series: Natural and technical Sciences*. 2014. Vol. 9. No. 3. p. 390–392. (in Russian)
 12. Maksimenko Yu. D. Effectiveness of mass transfer by rectification of multicomponent mixtures. *Bulletin of Astrakhan state technical University*. 2004. No. 1 (20). P. 225–230. (in Russian)
 13. Sidiyagin A. A., Stepikin A. V. Balakhnin I. A. Hydraulic resistance of the modular heat-mass-exchange nozzle. *Modern problems of science and education*. 2014. No. 6. p. 176–183. (in Russian)
 14. Sorokopud A. F., Strizhkov D. S., Kozymaev V. S. Study of the new contact element of the rotary spray device. *Equipment and technology of food production*. 2012. No 4 (27). p. 111–115. (in Russian)
 15. Ismagilov A. T. Methods of intensification of efficiency of catching of aerosols in devices of shock-inertial action. *Electronic scientific journal «Oil and Gas business»*. 2010. No. 1. P. 32. (in Russian)
 16. Kiss V. V. evaluation of the efficiency of absorption processes in the cyclone-foam apparatus. *Proceedings of VII international science-technical conference «Low-temperature and food technologies in XXI century»*. SPb.: ITMO University, 2015, p. 43–45. (in Russian)

Сведения об авторах

Кисс Валерий Вячеславович

к. т. н., доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, vvkiss@yandex.ru

Евдокимов Александр Александрович

к. т. н., доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, evdokimov@bk.ru

Каверзнева Татьяна Тимофеевна

к. т. н., доцент Высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического Университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, kaverztt@mail.ru

Румянцева Нина Вячеславовна

к. т. н., доцент Высшей школы техносферной безопасности Санкт-Петербургского политехнического Университета Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, rumyantseva_nina@mail.ru

Information about authors

Kiss Valerii Viacheslavovich

Ph. D., associate professor of Department Industrial ecology and life safety of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, vvkiss@yandex.ru

Evdokimov Aleksandr Aleksandrovich

Ph. D., associate professor of Department Industrial ecology and life safety of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, evdokimov@bk.ru

Kaverzneva Tatiana Timofeevna

Ph. D., associate Professor of the Higher school of technosphere safety of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251. St. Petersburg. Politekhnikeskaya, 29, kaverztt@mail.ru

Rumyantseva Nina Viacheslavovna

Ph. D., associate Professor of the Higher school of technosphere safety of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, 195251. St. Petersburg. Politekhnikeskaya, 29, rumyantseva_nina@mail.ru