

DOI: <https://doi.org/10.54422/1994-439X.2025.1-57.210-218>

УДК: 621.762.2

доктор техн. наук Кравцов А.Г.¹, доктор техн. наук Тумилович М.В.²,
Чешко Т.Н.³, Копытков В.В.³, Старосто Р.С.³.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЕПАРАЦИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ ИЗ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ЖИДКИМИ СОРБЕНТАМИ В ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ, КАК МЕТОД СНИЖЕНИЯ РИСКА БЕССИСТЕМНОЙ РАБОТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

¹*Отделение физико-технических наук НАН Беларуси, г. Минск*

²*Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск*

³*Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», г. Минск*

Проведено математическое моделирование процессов сепарации капель жидкости из газовых потоков жидкими сорбентами в пористых проницаемых материалах (ППМ) с учетом капиллярных характеристик и функции распределения пор ППМ по размерам, позволившее определить оптимальные значения среднего размера пор, толщины ППМ и разработать композиционный металлополимерный ППМ для очистки и осушки воздуха и других газов, в том числе при отрицательных температурах.

Ключевые слова: математическое моделирование, сепарация, газовые потоки, пористые проницаемые материалы.

Grand Ph.D. in Technology A.G.Kravtsov¹, Grand Ph.D. in Technology M.V.Tumilovich², T.N.Cheshko³, V.V.Kopytkov³, R.S.Starosto³

MODELING OF SEPARATION PROCESSES OF LIQUID DROPLETS FROM GAS FLOWS BY LIQUID SORBENTS IN POROUS PERMEABLE MATERIALS AS A METHOD OF REDUCING THE RISK OF UNSYSTEMOUS OPERATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

¹*Deputy of the Academician Secretary of the Department of Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk*

²*Educational Institution “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, Minsk*

³*State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk*

Mathematical modeling of the processes of separation of liquid droplets from gas flows by liquid sorbents in porous permeable materials (PPM) was carried out. taking into account the capillary characteristics and the function of the distribution of the pores of the PPM by size, which made it possible to determine the optimal val-

ues of the average pore size, the thickness of the PPM and to develop a composite metal-polymer PPM for cleaning and drying air and other gases, including at sub-zero temperatures.

Keywords: mathematical modeling, separation, gas flows, porous permeable materials.

(Поступила в редакцию 30 мая 2025 г.)

Введение

Перспективным направлением применения пористых проницаемых материалов (ППМ), определяемых их высокими капиллярными и фильтрующими свойствами, является очистка и осушка сжатых газов от механических примесей и влаги. Особенно остро стоит вопрос очистки и осушки сжатых газов в условиях эксплуатации пневмосистем при отрицательных температурах. Осушители, работающие при отрицательных температурах, обеспечивают бесперебойную работу приборов автоматики и технологического оборудования на компрессорных станциях газопроводов, а также устойчивую работу пневмоприводов тормозной системы автомобилей в зимний период.

Представляется возможным разработка композиционного металлополимерного ППМ для очистки и осушки воздуха и других газов (в т.ч. при отрицательных температурах) посредством математического моделирования процессов сепарации капель жидкости из газовых потоков жидкими сорбентами в ППМ с учетом капиллярных характеристик и функции распределения пор по размерам.

Основная часть

В процессе поглощения газа жидким поглотителем (адсорбции), равно, как и при выделении растворенного газа из раствора (десорбция) участвуют жидкая и газовая фазы, и осуществляются процессы массопереноса [1]. Адсорбируемыми компонентами газовых смесей являются поглощаемые поглотителем части смеси, и не поглощаемые составные, представленные инертным газом. В случае жидкой фазы различают раствор активного компонента (поглотитель) и адсорбируемый компонент. Различием физической и химической адсорбции выступает сопровождение растворения газа химической реакцией, так в случае отсутствия таковой наблюдается физическая адсорбция, в противном случае - хемосорбция.

Скорость массообмена определяется степенью отклонения системы от равновесного состояния, свойствами поглотителя, инертного газа и компонента, устройством аппарата адсорбции, а также гидродинамическим режимом его работы. Степень отклонения системы от равновесного состояния зависит от характера взаимного движения фаз.

Согласно закону Рауля [2] растворимость газа x при физической адсорбции идеального раствора определяется для компонентов системы по формуле (1) и при этом зависит только от температуры:

$$x_{uo}^* = \frac{p^*}{p^0}, \quad (1)$$

где P^0 – давление паров над чистым сжиженным газом при данной температуре системы;

p^* – парциальное давление газа в условиях равновесия;

* параметры вещества в условиях равновесия.

При физической адсорбции в бесконечно разбавленном растворе зависимость растворимости газов x^* от их парциального давления и описывается законом Генри [2]:

$$K_H = \frac{p^*}{x^*}, \quad (2)$$

где K_H – коэффициент Генри, изменяющийся с изменением температуры.

Скорость адсорбции определяется при использовании коэффициента массопередачи, вычисляемые по гипотетическим движущим силам. Обычно принимают, что коэффициент массопередачи, отнесенный к концентрации в газе, K_G [кмоль/(м²·МПа·с)] обусловлен движущей силой $(y_2 - y_2^*)$, где y_2^* – молярная доля поглощаемого компонента в газе, которая отвечает равновесию с жидкостью, имеющей средний объемный состав x_2 ; y_2 – средний объемный состав газа в данном сечении аппарата.

Таким образом, скорость адсорбции определим согласно формуле:

$$j_2 = K_G P (y_2 - y_2^*). \quad (3)$$

Движущую силу $(x_2^* - x_2)$ и коэффициент массопередачи по жидкости $K_{жс}$ определим аналогично.

Унос жидкости в жидкости в гравитационном сепараторе e , г/1000 м³ влияет на эффективность осушки и зависит от скорости в шестой степени:

$$e = \frac{\pi}{6} \cdot \left(\frac{3w^2 \gamma_z \nu}{4(\gamma_{жс} - \gamma_z) \cdot g} \right)^3 \cdot \gamma_{жс} \quad . \quad (6)$$

Обосновывается это выражением уноса в массовых единицах и диаметра сепарируемой частицы d . Для гравитационных сепараторов по закону Стокса диаметр капли, находящейся в равновесии (или равномерном движении), зависит от скорости в квадрате, т.е. диаметр сепарируемой частицы d равен:

$$d = \frac{3w^2 \gamma_z \nu}{4(\gamma_{жс} - \gamma_z) g}, \quad (4)$$

где d – диаметр сепарируемой частицы, м; w – скорость, м/с; γ_z – плотность газа, кг/м³; $\gamma_{жс}$ – плотность жидкости, кг/м³; ν – динамическая вязкость дисперсной среды, Н·с/м²; g – ускорение свободного падения, м/с².

При этом массу капли определяется по следующей формуле:

$$Q_c = \frac{\pi d^3 \gamma_{жс}}{6}, \quad (5)$$

где Q_c – масса капли, кг.

Для центробежных сепараторов общий унос жидкости из центробежного элемента складывается из уноса жидкости по оси элемента и вторичного уноса из сепаратора.

Диаметр сепарируемых частиц в центробежном элементе равен:

$$d = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c (R_{эл}^2 - R_{сеп}^2) \cdot w_0}{\gamma_{жс} \cdot H_{сеп} \cdot w_m^2}}, \quad (7)$$

где μ_c – кинематическая вязкость газа, м/с; $R_{эл}$ – радиус центробежного элемента, м; $R_{сеп}$ – внутренний радиус сепаратора, м; $H_{сеп}$ – высота сепаратора, м; w_0 – осевая скорость, с⁻¹; w_m – тангенциальная скорость, м/с.

Принимая, что осевая скорость равна тангенциальной и угол подъема капли осушаемой жидкости равен 45 °, получим:

$$d = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu_c (R_{эл}^2 - R_{сеп}^2)}{\gamma_{жс} \cdot H_{сеп} \cdot W_c^2}}. \quad (8)$$

Следовательно, унос жидкости по оси центробежного элемента будет равен:

$$d = \frac{\pi}{6} \gamma_{жс} \cdot \left(\frac{3}{2} \sqrt{\frac{\mu_c (R_{эл}^2 - R_{сеп}^2)}{\gamma_{жс} \cdot H_{сеп} \cdot W_c^2}} \right), \quad (9)$$

т.е. унос жидкости из центральной части элемента обратно пропорционален скорости в степени 1,5. Кроме того, унос жидкости по оси элемента увеличивается вследствие конструкции патрубков центробежных элементов.

Таким образом выяснили, что унос жидкости с газом зависит от скорости газа W_c в степени $n = 3,5$ и в меньшей степени зависит от физико-химических свойств газа и жидкости, высоты сепарационной зоны $H_{сеп}$, массового соотношения жидкости к газу L/G .

Следующим этапом является моделирование процесса отделения из газа с помощью ППМ. Важно при определении фильтрующих материалов учитывать тонкость очистки, коэффициент проницаемости с учетом производительности и капиллярных свойств (краевой угол смачивания θ).

Возможен вариант использования ППМ для отделения жидкого сорбента из проходящего газа, при этом принцип действия заключается в формировании крупных капель с последующим возвращением их в сепарационную секцию под действие гравитационных сил. Примем, что средний гидравлический размер пор ППМ равен ξ_0 , а дифференциальная функция распределения объема

пор по размерам $f(\xi)$. При этом важно обеспечить трансформацию мелких капель в более крупные при условии сохранения небольшого перепада давления на фильтроэлементе (ФЭ) из ППМ, что возможно при определении оптимального соотношения порораспределения.

Рассмотрим процесс улавливания частичек жидкости из потока газа, перпендикулярного ФЭ толщиной h . Перепад давления на ФЭ Δp_h будем считать заданным. Пусть объемная доля сорбента в газе равна C_0 , а средний размер частиц равен b .

В процессе улавливания частиц жидкости установим следующие допущения: прямое столкновение частицы со стенкой поры оказывает влияние на задержание частицы жидкости на ФЭ; поперечный размер поры равен ее длине в направлении потока (т.е. поры равноосны); вероятность прямого захвата частицы жидкости стенкой поры определяется на длине, равной среднему гидравлическому размеру пор, так что пористую структуру по толщине ФЭ можно мысленно разбить перпендикулярными направлению потока плоскостями, отстоящими друг от друга на расстояние ξ_0 ; сила тяжести не влияет на движение жидкости в ФЭ не учитывается; возможно рассмотреть набор пор одного диаметра (ξ_0), вследствие узкой функции порораспределения у ППМ.

В соответствии с принятыми допущениями вероятность прямого захвата определяется долей частиц жидкости, содержащихся в слое газа, отстоящем не более, чем на расстоянии $b/2$ от стенки поры. Тогда вероятность прямого захвата (P) по длине ξ_0 равна [3]:

$$P = \frac{\xi_0^2 - (\xi_0 - b)^2}{\xi_0^2} = \frac{b(2d_0 - b)}{\xi_0^2}. \quad (10)$$

Объем жидкости, задерживаемый при движении через плоскости 0 и ξ_0 численно равен:

$$r_1 = C_0 P, \quad (11)$$

Исходя из этого, принимаем факт поступления в слой между плоскостями ξ_0 и $2\xi_0$ газа с частью жидкости в следующем объеме:

$$C_1 = C_0 - r_1 = C_0(1 - P). \quad (12)$$

Жидкость, задерживаемая, при прохождении между плоскостями $(k - 1)\xi_0$ и $k\xi_0$, определяется по следующей формуле:

$$r_k = C_0(1 - P)^{k-1}P, \quad (13)$$

а в слой, заключенный между плоскостями $k\xi_0$ и $(k + 1)\xi_0$ поступает газ с объемной долей жидкости:

$$C_k = C_0(1 - P)^k. \quad (14)$$

Учитывая равенство $x = k\xi_0$ к непрерывной функции координаты x сведем

формулу (14) к более удобному виду:

$$C(x) = C_0(1 - P)^{\frac{x}{\xi_0}} = C_0\left(1 - \frac{b}{\xi_0}\right)^{\frac{2x}{\xi_0}}. \quad (15)$$

Важно определить поток газа, проходящий через ФЭ. Так, вследствие плохой смачиваемости мелкопористого материала [4], газ движется по мелким порам, жидкость по крупным.

Скорость газа при прохождении через поры с диаметром от ξ и до $\xi + d\xi$ будем учитывать, используя технологию для пористых материалов с анизотропной структурой [5]:

$$v(d) = \frac{k(\xi)}{\mu_a} \cdot \frac{\Delta p_h}{h}, \quad (16)$$

где $k(\xi)$ – коэффициент проницаемости поры диаметром ξ ;

μ_a – динамическая вязкость воздуха.

Тогда поток газа через свободные от жидкости поры будет равен:

$$q_a = \int_{\xi_{\min}}^{\xi_2} v(d) \frac{dS}{d\xi} d\xi = \int_{\xi_{\min}}^{\xi_2} \frac{k(\xi)}{\mu_a} \cdot \frac{\Delta p_h}{Ph} \cdot \frac{dS}{d\xi} d\xi, \quad (17)$$

где S – площадь поперечного сечения пор с диаметром в интервале $\xi, \dots, \xi + d\xi$;

Ph – пористость материала;

ξ_{\min} – минимальный размер пор.

Объемная доля жидкости изменяется вдоль направления течения (13), данную зависимость следует учитывать. Количество жидкости, которое задерживается при прохождении между вытекающими и втекающими потоками, определяется согласно закону сохранения массы. Поток жидкости через 0 — ξ_0 слой определяется по формуле (18) с учетом (11):

$$q_{l1} = r_l q_a = C_0 P q_a. \quad (18)$$

Поток, поступающий из слоя ξ_0 — $2\xi_0$, а также поток, задерживаемый из газа в совокупности представляет поток через слой 0 — ξ_0 , и определяется согласно формуле:

$$q_{l2} = C_0 P q_a + C_0(1 - P)P q_a. \quad (19)$$

Учитывая вышесказанное рассчитаем поток жидкости через слой, находящийся между плоскостями $(k - 1) \xi_0$ и $k \xi_0$:

$$q_{lk} = C_0 P q_a + C_0(1 - P)P q_a + \dots + C_0(1 - P)^{k-1} P q_a = C_0 q_a [1 - (1 - P)^k]. \quad (20)$$

Формула расчета потока жидкости через слой $(k - 1) \xi_0$ — $k \xi_0$ обосновывает-

ся диаметром пор от ξ_z до ξ_{max} и имеет следующий вид:

$$q_{lk} = \int_{\xi_z}^{\xi_{max}} \frac{k(\xi)}{\mu_l} \cdot \frac{\Delta p_{lk}}{\Pi \xi_0} \cdot \frac{dS}{d\xi} d\xi, \quad (21)$$

где μ_l – динамическая вязкость жидкости;

Перепад давления в жидкости (Δp_{lk}) в слое ($k - 1$) $\xi_0 \rightarrow k\xi_0$, определяется выражением из формулы потока жидкости (21) при прохождении через данный поток и записывается в виде:

$$\Delta p_{lk} = q_{lk} \Pi \xi_0 \mu_0 \left[\int_{\xi_z}^{\xi_{max}} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi \right]^{-1}. \quad (22)$$

Значения перепада давления (Δp_h) на ФЭ рассчитывается суммированием перепадов давления во всех слоях:

$$\Delta p_h = \sum_{k=1}^{h/\xi_0} \Delta p_{lk}. \quad (23)$$

Перепад давления с учетом формулы расчета потока жидкости через слой, находящийся между плоскостями ($k - 1$) ξ_0 и $k\xi_0$ после преобразования определяется по формуле:

$$\Delta p_h = \Pi \cdot \xi_0 \cdot \mu_l \cdot C_0 \cdot q_a \left[\int_{\xi_z}^{\xi_{max}} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi \right]^{-1} \left(\frac{h}{\xi_0} + (1-P) \frac{1-(1-P)^{\frac{h}{\xi_0}}}{P} \right). \quad (24)$$

Выражение граничного диаметра (ξ_z) получим оптимизируя выражения (24) и (17) исключением q_a , в результате оно имеет вид:

$$\int_{\xi_z}^{\xi_{max}} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi = C_0 \int_{\xi_{min}}^{\xi_z} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi \left(1 + \frac{\xi_0}{h} (1-P) \frac{1-(1-P)^{\frac{h}{\xi_0}}}{P} \right) \frac{\mu_l}{\mu_a}. \quad (25)$$

Полученное выражение доказывает отсутствие зависимости значения величины граничного диаметра ξ_z от Δp_h .

Отметим, что сумма интегралов (25) величина постоянная и обозначим I , выражение примет следующий вид:

$$\int_{\xi_z}^{\xi_{max}} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi + \int_{\xi_{min}}^{\xi_z} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi = \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi = I, \quad (26)$$

Таким образом видоизменим выражение в форму, удобную для вычислений:

$$\int_{\xi_{\min}}^{\xi} k(\xi) \frac{dS}{d\xi} d\xi = \frac{I}{\frac{\mu_l}{\mu_a} C_0 \left(1 + \frac{\xi_0}{h} (1-P) \frac{1 - (1-P)^{\frac{h}{\xi_0}}}{P} \right) + 1}. \quad (27)$$

Заключение

Результатом математического моделирования является система уравнений, позволяющая рассчитывать характеристики жидкогазового потока, такие как вероятность прямого захвата, размер пор и поток газа. Поток жидкости q_a рассчитаем используя формулу расчета потока жидкости через слой, заключенный между плоскостями, обозначив его для крайнего слоя $h - \xi_0 \rightarrow h$ в виде:

$$q_l = C_0 q_a \left[1 - (1-P)^{\frac{h}{\xi_0}} \right]. \quad (28)$$

Таким образом, определить оптимальные значения размера пор (20 мкм), толщины ППМ (4 мм), а также проработать варианты композиционного металлополимерного ППМ для очистки и осушки воздуха и других газов (также при отрицательных температурах), возможно используя описанный процесс сепарации капель жидкости из потока газа на ППМ с учетом капиллярных характеристик и функции распределения пор ППМ по размерам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Химическая энциклопедия : в 5 т. – Москва: Большая Росс. Энциклопедия, 1998. – 787 с.
2. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. – Москва: Химия, 1984. – 592 с.
3. Формование структуры и свойств пористых порошковых материалов / П.А. Витязь [и др.]; – Москва: Металлургия, 1993. – 240 с.
4. Тумилович, М.В. Разработка пористых материалов и устройств на их основе для очистки и осушки газов при отрицательных температурах / М.В. Тумилович, В.В. Савич, Л.П. Пилиневич // Порошковая металлургия. – Минск: Белорусская наука. – 2008. – Вып. 31. – С. 254–258.
5. Мазюк, В.В. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой: методы получения / В.В. Мазюк, Л.П. Пилиневич, А.Л. Рак, В.В. Савич, М.В. Тумилович // Под ред. П.А. Витязя. – Мн: «Тонпик», 2006. – 268 с.
6. Тумилович, М.В. Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение / М.В. Тумилович, Л.П. Пилиневич, В.В. Савич, А.Е. Галкин, О.Л. Сморгонь. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 356 с.

REFERENCES

1. Khimicheskaya entsiklopediya : v 5 t. – Moskva: Bolshaya Ross. Entsiklopediya, 1998. – 787 s.

2. Keltsev, N.V. Osnovy adsorbtsionnoi tekhniki / N.V. Keltsev. – Moskva: Khimiya, 1984. – 592 s.
3. Formovanie struktury i svoistv poristyykh poroshkovykh materialov / P.A. Vityaz [i dr.]; – Moskva: Metallurgiya, 1993. – 240 s.
4. Tumilovich, M.V. Razrabotka poristyykh materialov i ustroystv na ikh osnove dlya ochistki i osushki gazov pri otritsatelnykh temperaturakh / M.V. Tumilovich, V.V. Savich, L.P. Pilinevich // Poroshkovaya metallurgiya. – Minsk: Belorusskaya nauka. – 2008. – Vyp. 31. – S. 254–258.
5. Mazyuk, V.V. Poristye poroshkovye materialy s anizotropnoi strukturoi: metody polucheniya / V.V. Mazyuk, L.P. Pilinevich, A.L. Rak, V.V. Savich, M.V. Tumilovich // Pod red. P.A. Vityazya. – Mn: «Tonpik», 2006. – 268 s.
6. Tumilovich, M.V. Poristye poroshkovye materialy i izdeliya na ikh osnove dlya zashchity zdorovya cheloveka i okhrany okruzhayushchei sredy: poluchenie, svoistva, primenenie / M.V. Tumilovich, L.P. Pilinevich, V.V. Savich, A.E. Galkin, O.L. Smorygo. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2010. – 356 s.

