УДК 62-764+66.081+544.723.23

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОСУШКИ ВОЗДУХА СИЛИКАГЕЛЕМ

*Калугина О.Г., аспирант
кафедра «Экология и промышленная безопасность»
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Павлихин Г.П., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
E9@mx.bmstu.ru*

1. Введение

Согласно ГОСТ Р 51330.3-99, заполнение или продувка оболочек под избыточным давлением защитного газа может выступать в качестве самостоятельного вида взрывозащиты электрооборудования. Во многих системах содержания оболочек под статическим избыточным давлением в качестве защитного газа применяют атмосферный воздух, предварительно прошедший осушку и очистку [1, 2]. При этом процессы контроля расходных характеристик газа и герметичности оболочек, выдачи аварийных сигналов, очистки и осушки атмосферного воздуха, а также бесперебойной подачи защитного газа под статическим избыточным давлением объединены в едином технологическом цикле работы специальных многофункциональных установок. Наиболее наглядным примером подобного рода установок являются компрессорно-сигнальные установки (КСУ), применяемые для содержания под постоянным избыточным воздушным давлением кабельных линий связи городских телефонных сетей (ГТС) [2, 3]. В КСУ, как и во многих аналогичных установках других областей применения, на конечной стадии подготовки защитного газа, лимитирующим является контролируемый процесс адсорбционной осушки воздуха с использованием неподвижного слоя силикагеля. Зачастую, расчет этого адсорбционного процесса в подобного рода установках осуществляется профильными специалистами на базе опыта предшествующих разработок общепромышленных осушителей [4], который не учитывает специфических особенностей работы систем содержания оболочек под статическим избыточным давлением защитного газа. В определенных условиях, это приводит к возникновению целого ряда опасных технологических факторов, которые

<http://sntbul.bmstu.ru/doc/634791.html>

способствуют развитию различных аварийных ситуаций, вплоть до полного выхода из строя защищаемой системы.

Указанное обстоятельство связано не только, с отсутствием стандартных методов расчета адсорбционных процессов, учитывающих особенности применения различного рода адсорбентов и их программного обеспечения, но и с незавершенностью теоретических основ построения инженерных методик расчета этих процессов, способных учесть специфические особенности самих систем содержания объектов под избыточным давлением. Исходя из этого, в области техносферной безопасности, разработку теоретических моделей процесса адсорбционной осушки воздуха в установках для содержания оболочек под статическим избыточным давлением можно отнести к актуальной и практически значимой тематике.

2. Теоретическая модель процесса осушки воздуха силикагелем.

Рассмотрим процесс изотермической адсорбционной осушки воздуха силикагелем на примере работы цилиндрического адсорбера с неподвижным однородным слоем адсорбента, длиной – L_0 и осредненной площадью свободного поперечного сечения – F_0

Введем в рассмотрение систему отсчета, связанную с координатой оси симметрии адсорбера – S и временем – t , которое отсчитывается с начала процесса подачи влажного воздуха в адсорбер.

Допуская, что на силикагеле (адсорбенте) сорбируется лишь один компонент – влага, будем считать, что несущая среда – воздух, является несжимаемой, а концентрация влаги в ней настолько мала, что изменением плотности потока из-за убыли адсорбтива можно пренебречь. Предположим, что в полностью отрегенированный адсорбент подается влажный воздух с постоянной концентрацией – c_w равной концентрации насыщенных паров воды – c_s и объемным расходом – $Q_0 = Q_0(t)$, а движение потока воздуха в слое адсорбента происходит со средней скоростью – $W_0 = Q_0 / F_0 = W_0(t)$ в направлении уменьшения концентрации адсорбата.

В рамках сделанных допущений, используя уравнение материального баланса, можно получить феноменологическую систему уравнений динамики равновесной изотермической адсорбции с учетом процесса продольной диффузии адсорбтива в слое адсорбента в виде [4,5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial a'}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial t} = -W_0 \frac{\partial c}{\partial S} + D \frac{\partial^2 c}{\partial S^2} \\ a = \psi(c) \end{cases} \quad (1)$$

где $a = \psi(c)$ – уравнение изотермы адсорбции, D – коэффициент продольной диффузии, c – текущая концентрация адсорбтива в потоке, a и a' – соответственно, равновесные ей величины адсорбции и концентрации адсорбата.

Поскольку равновесные величины a и a' однозначно связаны между собой соотношением $a' = a\rho_N$, где $\rho_N = \text{const}$ – насыпная плотность адсорбента, используя метод подстановки, первое уравнение системы (1) можно представить как:

$$\frac{\partial c(S, t)}{\partial t} = -W' \frac{\partial c(S, t)}{\partial S} + D^* \frac{\partial^2 c(S, t)}{\partial S^2} \quad (2)$$

где $W' = W_0 / (1 + \rho_N \frac{da}{dc})$ и $D^* = D / (1 + \rho_N \frac{da}{dc})$ – скорость движения адсорбтива по слою адсорбента и эквивалентный коэффициент продольной диффузии соответственно.

В общем случае, система (1) образует систему с нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных, аналитического решения которого в настоящее время не получено. Известны точные решения системы (1) и уравнения (2) при различных начальных и граничных условиях с использованием различных упрощающих допущений [4,5], в том числе, когда изотермы адсорбции являются прямыми (изотермы Генри). Однако эти решения сложны и на практике обычно не используются [4]. Применительно к процессам осушки воздуха, даже при $W' = \text{const}$, $D^* = \text{const}$, решения системы (1) и уравнения (2), как правило, не могут быть представлены в виде элементарных функций [4,5].

Как было показано [6], при рассмотрении большинства практических вопросов динамики адсорбции, обычно не ставится задача точного молекулярно-кинетического или микроскопического описания явлений. При отыскании функций распределения адсорбтива и/или адсорбата в слое адсорбента, наряду с феноменологическим подходом [4,5], может быть также использован вероятностно-статистический подход [5,7], базирующийся на методах статистической физики, в частности уравнении диффузионного типа Фоккера – Планка – Колмогорова (ФПК):

$$\frac{\partial f(S, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial S} (W'(S, t) f(S, t)) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} (B_0(S, t) f(S, t)) \quad (3)$$

где $W'(S, t)$ и $B_0(S, t)$ – величины, характеризующие в пространстве S соответственно среднюю детерминированную скорость эволюции системы и интенсивность случайных составляющих протекающих процессов.

Анализ величин $W'(S, t)$ и $B_0(S, t)$, входящих в уравнение (3), показывает, что в рамках сделанных допущений мы будем исходно предполагать независимость средней скорости движения фронта адсорбции от координаты $W'(S, t) = W'(t)$ и стационарность интенсивности случайных возмущений процесса $B_0 = B_0(S) = const$. Тогда, для описания гидродинамической стадии эволюции системы в пространстве S мы можем представить уравнение (3) в виде:

$$\frac{\partial f(S, t)}{\partial t} = -W'(t) \frac{\partial}{\partial S} f(S, t) + \frac{B_0}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} f(S, t). \quad (4)$$

Решения уравнения (4) уже могут быть представлены в виде элементарных функций, что в свою очередь значительно расширяет возможности практического применения уравнения ФПК.

Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод, что применительно ко многим адсорбционным процессам, уравнение ФПК способно выполнять важную роль связующего звена между теорией дифференциальных уравнений и теорией случайных процессов. В результате, применительно к нахождению функции распределения адсорбтива и/или адсорбата в слое адсорбента для рассматриваемых условий появляется возможность установить взаимосвязь между результатами исследований вероятностно-статистического и феноменологического подходов.

Предложен метод расчета параметров осушки воздуха, базирующийся на использовании определяющих точек (A, B, C, D) изотермы адсорбции паров воды на силикагеле. Было показано [6], что особенности поведения точек фронта адсорбции в первом приближении можно смоделировать, путем рассмотрения в пространстве и времени, двух независимых множеств адсорбтива, имеющих функции плотности распределения $f_I(S, t_I)$ и $f_{II}(S, t_{II})$, соответствующие выпуклым участкам изотермы адсорбции, которые перемещаются по слою адсорбента с различными средними скоростями $W'_I(t_I)$ и $W'_{II}(t_{II})$:

$$W'_I(t_I) = W'_A(t_I) = W_0(t_I) \cdot c_I / (c_I + \rho_N a_I) \approx W_0(t_I) \frac{c_I}{\rho_N a_I}, \quad (5)$$

$$W'_{II}(t_{II}) = W_0(t_{II}) / (1 + \rho_N \frac{a_D - a_C}{c_D - c_C}) \approx W_0(t_{II}) \frac{c_D - c_C}{\rho_N (a_D - a_C)} \quad (6)$$

где c_C и c_D – текущие концентрации адсорбтива в потоке в определяющих точках C и D изотермы адсорбции; a_D и a_C – равновесная величина адсорбции в определяющих точках C и D изотермы адсорбции; W'_A – средняя скорость движения точки A фронта адсорбции.

Для различных коэффициентов продольной диффузии D_I и D_{II} , рассматриваемых множеств адсорбтива, из уравнения (4), с учетом (5) и (6) получаем:

$$\frac{\partial f_I(S, t_I)}{\partial t_I} = -W'_I(t_I) \frac{\partial}{\partial S} f_I(S, t_I) + \frac{B_I}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} f_I(S, t_I), \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_{II}(S, t_{II})}{\partial t_{II}} = -W'_{II}(t_{II}) \frac{\partial}{\partial S} f_{II}(S, t_{II}) + \frac{B_{II}}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} f_{II}(S, t_{II}),$$

(8)

где $B_I = 2D_I c_I / (c_I + \rho_N a_I) \approx 2D_I \frac{c_I}{\rho_N a_I}$ и

$$B_{II} = 2D_{II} / (1 + \rho_N \frac{a_D - a_C}{c_D - c_C}) \approx 2D_{II} \frac{c_D - c_C}{\rho_N (a_D - a_C)}$$

С помощью уравнений (7) и (8) можно описать поведение всего фронта адсорбции в целом. Однако они, используя линейные изотермы адсорбции, не учитывают особенностей всех участков изотермы адсорбции, в частности выпуклых участков.

Введем в два последних уравнения дополнительные члены, существование которых не следует из уравнения материального баланса. Они, в первом приближении будут учитывать влияние нелинейности выпуклых участков изотермы адсорбции, а их наличие постулируется предлагаемой моделью.

В результате имеем:

$$\frac{\partial f_I}{\partial t_I} = k_I \frac{\partial(x_I f_I)}{\partial x_I} + b_I \frac{\partial^2 f_I}{\partial x_I^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial f_{II}}{\partial t_{II}} = k_{II} \frac{\partial(x_{II} f_{II})}{\partial x_{II}} + b_{II} \frac{\partial^2 f_{II}}{\partial x_{II}^2},$$

(10)

где k_I и k_{II} – некоторые постоянные коэффициенты, учитывающие влияние нелинейности выпуклых участков изотермы адсорбции.

Тогда окончательно для функции плотности распределения $f = f(S, t)$ получаем:

$$\begin{aligned}
 f = f(S, t) &= f_I(S, t_I) + f_{II}(S, t_{II}) = \\
 &= C_I e^{k_I t_I} \left[\frac{\pi B_I}{k_I} (e^{2k_I t_I} - 1) \right]^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{k_I \left((S - \int W'_I(t_I) dt_I) e^{k_I t_I} - \xi \right)^2}{B_I (e^{k_I t_I} - 1)} \right] f_{0I}(\xi) d\xi + \\
 &+ C_{II} e^{k_{II} t_{II}} \left[\frac{\pi B_{II}}{k_{II}} (e^{2k_{II} t_{II}} - 1) \right]^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{k_{II} \left((S - \int W'_{II}(t_{II}) dt_{II}) e^{k_{II} t_{II}} - \xi \right)^2}{B_{II} (e^{k_{II} t_{II}} - 1)} \right] f_{0II}(\xi) d\xi
 \end{aligned}$$

где k_I и k_{II} – некоторые постоянные коэффициенты, учитывающие влияние нелинейности выпуклых участков изотермы адсорбции; C_I и C_{II} – постоянные, определяемые величиной соответствующего множества и в любой момент времени t , удовлетворяющие, условиям нормировки функции плотности распределения $f = f(S, t)$ в виде: $\int f(S, t) dS = \int (f_I(S, t_I) + f_{II}(S, t_{II})) dS = 1$; f_{0I} и f_{0II} – функции плотности распределения задающие начальные условия.

Представленное выражение, определяя явный вид искомой функции $f = f(S, t)$, позволяет решить целый ряд важных практических задач. Используя его, можно найти распределение концентрации адсорбтива и (или) адсорбата по длине слоя адсорбента в любой момент времени, в зависимости от конструктивных и технологических параметров процесса. Это выражение позволяет также изучить влияние начальных распределений на вид функции $f = f(S, t)$. Основываясь на явном выражении для функции $f = f(S, t)$ можно рассчитать динамическую активность слоя адсорбента, время защитного действия адсорбера, длину фронта адсорбции и целый ряд других величин, необходимых для расчета процесса адсорбционной осушки воздуха силикагелем с учетом специфики его применения в системах содержания объектов под избыточным давлением.

3. Основные результаты работы.

1. Продемонстрирована возможность применения вероятностно-статистического метода расчета процесса адсорбционной осушки воздуха силикагелем, с учетом особенностей его изотермы адсорбции.

2. Показано, что изменение функции плотности распределения $f = f(S, t)$, по длине слоя адсорбента в любой момент времени может быть описано на основе

уравнений диффузионного типа, в частности с помощью уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова.

3. Теоретически доказано, что в рамках предложенной модели, процесс адсорбционной осушки воздуха силикагелем может быть представлен в виде эволюции усеченной двухмодальной функции плотности распределения $f = f(S, t)$, характеризующей состояние рассматриваемой системы на гидродинамической стадии её эволюции.

Список литературы

1. Jack Price. It's raining in our cables. // Outside Plant /June, 1998. С. 44-47.
2. Руководство по содержанию кабельных линий городских телефонных сетей под избыточным давлением/М-во связи СССР. ГУТС. – М.: Радио и связь, 1982.- 72 с.
3. Руководство по строительству линейных сооружений местных сетей связи, Ч.2. /М-во связи РФ. – М.: АООТ "ССКТБ-ТОМАСС", 1995.- 307 с.
4. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1984.- 592 с.
5. Рачинский В.В. Введение в общую теорию динамики сорбции и хроматографии. – М.: Наука, 1964.- 136 с.
6. Павлихин Г.П., Калугина О.Г., Львов В.А. Вероятностно-статистическая модель процесса осушки воздуха силикагелем в установках для содержания оболочек под статическим избыточным давлением. // Безопасность в техносфере, №6. – 2012. – С.20-27.
7. Протодьяконов И. О., Богданов С. Р. Статистическая теория явлений переноса в процессах химической технологии. – Л.: Химия, 1983.- 400 с.