

ФИЗИКА

УДК 517.958:532;512.62

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ НА ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННОМ КИСЛОРОДЕ

д-р техн. наук Г.М. АЛЕЙНИКОВА
(Донецкий институт туристического бизнеса)
д-р техн. наук С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ, В.В. АЛЬХОВКО
(Полоцкий государственный университет)

Предложена модель качественного описания нестационарного температурного поля, вызванного динамической сорбционной активностью. Рассмотрена задача оптимизации теплового режима регенеративного патрона цилиндрической формы в результате реверса воздушного потока.

Задача динамики сорбции лежит в основе широкого круга промышленных и природоохранных технологий. Область применения данных технологий составляют производства с опасными для жизнедеятельности человека выбросами, изолированные от внешней среды аппараты военной и космической отрасли, чрезвычайные ситуации, для ликвидации которых зачастую необходимы автономные источники кислорода для дыхания.

Резервирование кислорода в химически связанном виде является наиболее эффективным способом среди используемых в настоящее время.

Весьма перспективными для применения в качестве активных элементов (сорбентов) являются супероксиды щелочных металлов. При аналогичных массе и габаритах аппараты на химически связанном кислороде способны обеспечить больший выход O_2 и, как следствие, более длительное время полезной работы аппарата.

К сожалению, в настоящее время ресурс дыхательных аппаратов в течение гарантированного срока защитного действия используется лишь на треть. Детальный анализ показывает, что одной из основных причин этого является перегрев и спекание кислородсодержащего вещества. Именно высокая концентрация химически связанного кислорода приводит к выбросу экзотермического тепла при разрыве химических связей. Поэтому построение математической модели температурного поля является необходимым этапом на пути повышения эффективности регенеративных дыхательных аппаратов (РДА).

Для описания тепловых процессов, протекающих в регенеративном патроне вследствие хемосорбции CO_2 , воспользуемся уравнением

$$\theta'_t = q + a \Delta \theta, \quad (1)$$

в котором θ – температура; a – коэффициент температуропроводности продукта; q – удельная мощность внутренних источников температуры; Δ – оператор Лапласа. В силу симметрии распределение температуры в цилиндрическом патроне не зависит от полярного угла φ ($\theta'_\varphi = 0$). Кроме того, для высоких патронов (или при теплоизолированных торцах) можно пренебречь зависимостью от высоты ($\theta'_z = 0$).

В результате уравнение (1) принимает вид

$$\theta'_t = q + a(\theta''_r + \theta'_r/r), \quad (2)$$

где r – полярный радиус.

Удельную мощность внутренних источников температуры, повышающейся за счет реакции поглощения кислородсодержащим продуктом паров воды и диоксида углерода, можно представить в виде

$$q = \kappa U'_t, \quad (3)$$

где U – объемная концентрация захваченных сорбентом молекул CO_2 ; κ – коэффициент температуротворности процесса.

Весь процесс выделения и распространения тепла удобно разделить на три принципиально различные стадии. Критерием для их выделения будем считать температуру сорбента. Первая стадия характеризуется асимптотическим нарастанием температуры от комнатной до температуры спекания сорбента ($\theta < \theta_c$). Так как продукт представляет собой массив пористых гранул, разделенных воздушной прослойкой, коэффициент теплопроводности a при условии $\theta < \theta_c$ можно считать пренебрежительно малой постоянной величиной $a(r, t) \approx 0$.

С учетом перечисленных факторов уравнение (1) принимает вид:

$$\theta'_t = q, \tag{4}$$

откуда с учетом (3)

$$\theta - \theta_0 = \kappa U, \tag{5}$$

где θ_0 – температура окружающей среды.

На второй стадии наступает момент, когда приток тепла компенсируется его оттоком, благодаря чему температура продукта остается практически постоянной ($\theta \approx \theta_c = const$). В этой ситуации необходимо рассматривать полное уравнение (1).

Из-за спекания сорбирующего продукта поверхность контакта реагентов уменьшается, и на третьей стадии мощность внутренних источников асимптотически снижается до нуля. Дальнейшая эволюция процесса сводится к тому, что фронт спекания медленно смещается к периферии, а в отработанной части устанавливается квазистационарное распределение температур. Это позволяет для небольших промежутков времени опустить в (1) θ'_t , в результате чего для распределения температуры получается уравнение Лапласа:

$$\theta''_{rr} + \theta'_r/r = 0, \tag{6}$$

которое следует дополнить граничными условиями:

$$\theta(r_0) = \theta_0; \tag{7}$$

$$\theta(r_c) = \theta_c. \tag{8}$$

Решение задачи (6) – (8) имеет вид

$$\theta - \theta_0 = (\theta_c - \theta_0) \ln(r/r_0) / \ln(r_c/r_0). \tag{9}$$

Зависимость от времени входит в (9) неявно через радиус спекания r_c .

На рис. 1 приведены экспериментальные кривые зависимости температуры кислородсодержащего продукта от времени в различных сечениях регенеративного патрона. Максимумы температуры по слоям несколько отличаются друг от друга, достигая наибольшего значения для среднего слоя. Это вполне объяснимо, так как средний слой дальше расположен от хорошо проводящей металлической поверхности патрона. Однако это различие максимумов по слоям, в принципе, невелико и составляет всего 10 °С,

так что принятое допущение об одинаковости максимальных температур для любых слоев регенеративного патрона вполне соответствует действительности.

Очевидно, что наибольший интерес представляет первая стадия сорбции. Во время ее протекания обеспечены как очистка воздуха, так и температурный режим. Согласно (5) благодаря низкой теплопроводности продукта на первой стадии увеличение температуры продукта с точностью до коэффициента совпадает с концентрацией сорбированных молекул CO_2 , выполняющих роль топлива в экзотермической реакции. Иными словами, тепло сохраняется в месте своего выделения.

Для увеличения длительности полезной работы РДА нужно интенсифицировать отвод тепла. Обычно для этого пронизывают продукт решеткой из высокотеплопроводных материалов. Однако прежде всего необходимо включить в теплоем всю массу самого кислородсодержащего продукта. Поскольку тепло выделяется в каждом элементарном акте сорбции, требуется обеспечить более равномерное распределение связанного углерода в толще продукта.

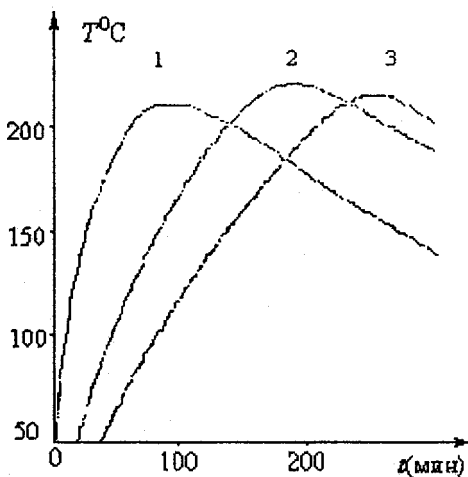


Рис. 1. Экспериментальные кривые зависимости температуры продукта от времени в различных сечениях патрона:
1 - лобовой слой; 2 - средний слой;
3 - замыкающий слой

При радиальном протекании воздуха через патрон цилиндрической формы (направление изнутри - наружу) наиболее «нагруженными» являются первые внутренние слои сорбента - в них поглощается практически весь углекислый газ. Поэтому температура первых слоев резко возрастает, происходит их спекание и преждевременное исключение из дальнейшей работы. В плане предотвращения описанного явления перспективен реверс воздушного потока [1]. При аналогичном объеме выдоха поверхность работающего слоя значительно больше, происходит более равномерное распределение экзотермического тепла и можно ожидать улучшения теплового режима РДА в целом.

Исследуем распределение плотности сорбированных молекул в каждом случае и сравним результаты.

При течении изнутри наружу за время dt в цилиндрическом слое продукта, в котором молекулы преодолевают расстояние dr , будут захвачены молекулы CO_2 в количестве, равном

$$2\pi r h V_0 (W(r, t) - W(r + dr, t)) dt, \quad (10)$$

где $W(r, t)$ - их концентрация в протекающем через патрон воздухе; V_0 - скорость течения на входе в сферический слой ($r = r_0$).

С другой стороны, число захваченных молекул равно

$$2\pi r^2 dr ((W + U)_{t+dt} - (W + U)_t), \quad (11)$$

где U - объемная концентрация захваченных молекул.

Приравняв выражения (10) и (11), получим уравнение, отражающее баланс CO_2 :

$$-V_0 (r_0/r) W'_r = (W + U)'_t. \quad (12)$$

Введем безразмерные время и радиус:

$$\tau = t\beta\gamma, \quad \zeta = r\beta/V_0, \quad (13)$$

после чего уравнение (12) запишем в виде

$$-(\zeta_0/\zeta) W'_\zeta = \gamma (W + U), \quad (14)$$

где $\zeta_0 = \zeta(r_0)$; γ - введенная в [2] феноменологическая константа, характеризующая сорбционную емкость продукта.

Сделаем замену переменных

$$\xi = (\zeta^2 - \zeta_0^2)/2\zeta_0, \quad (15)$$

получим уравнение

$$-W'_\xi = \gamma (W + U)'_\tau, \quad (16)$$

описывающее случай плоскопараллельного течения воздуха [2]. При этом существенно, что граничное условие $W(\xi(r_0)) = W(0) = W_0$, в котором W_0 - концентрация CO_2 на входе в продукт, также совпадает с фигурирующим в [2].

Таким образом, задача свелась к ранее решенной. Приведенная концентрация $u(\xi, \tau)$ связанных молекул CO_2 получается из имеющейся в [2] формулы

$$u(\xi, \tau) = e^{-\xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\xi^n}{n!} \left(1 - e^{-\tau} \sum_{k=0}^n \frac{\tau^k}{k!} \right) \quad (17)$$

заменой обезразмеренной декартовой координаты ξ , на выражение, определяемое формулами (15), (13)

$$\xi(r) = \frac{\beta(r^2 - r_0^2)}{2V_0 r_0} = \frac{\pi h \beta (r^2 - r_0^2)}{Q} = \frac{\beta w(r)}{Q}, \quad (18)$$

где Q - объемный расход воздуха; $w(r)$ - объем цилиндрического слоя, отвечающий данному значению ξ .

Имея в виду последнее равенство (18), для случая реверса потока можно записать

$$\xi(r) = \frac{\beta w(r)}{Q} = \frac{\pi h \beta (R^2 - r^2)}{Q}, \quad (19)$$

где R – внешний радиус патрона.

Тот же результат получается непосредственно, если выражение (10) переписать в следующем виде:

$$2\pi R h v_0 (W(r+dr, t) - W(r, t)) dt, \quad (20)$$

где v_0 – скорость течения на входе в сферический слой извне ($r = R$).

Из неразрывности воздушного потока следует равенство $v_0 R = V_0 r_0$. С его учетом (12) принимает вид:

$$v_0 (R/r) W'_r = (W + U)'_t. \quad (21)$$

Дальнейшие действия аналогичны вышеизложенным:

$$\zeta = r\beta/v_0; \quad \xi = (\zeta_0^2 - \zeta^2)/(2\zeta_0), \quad (22)$$

$$\xi(r) = \frac{\beta(R^2 - r^2)}{2v_0 R} = \frac{\pi h \beta (R^2 - r^2)}{Q}, \quad (23)$$

что вновь приводит к уравнению (16) с тем же граничным условием: $W(\xi(R)) = W(0) = W_0$.

По результатам проведенных исследований построены графики (рис. 2), отражающие распределение приведенной концентрации сорбированных молекул CO_2 в патроне. В качестве примера взят патрон с обезразмеренной длиной $\eta = 15$, что соответствует дыхательному аппарату РХС в 5-м режиме эксплуатации [3]. Для него критический проскок CO_2 наступает при $\tau = 12$, $\omega(15, 12) = 0,375$). Этот момент обезразмеренного времени использован в (17) при построении упомянутых графиков.

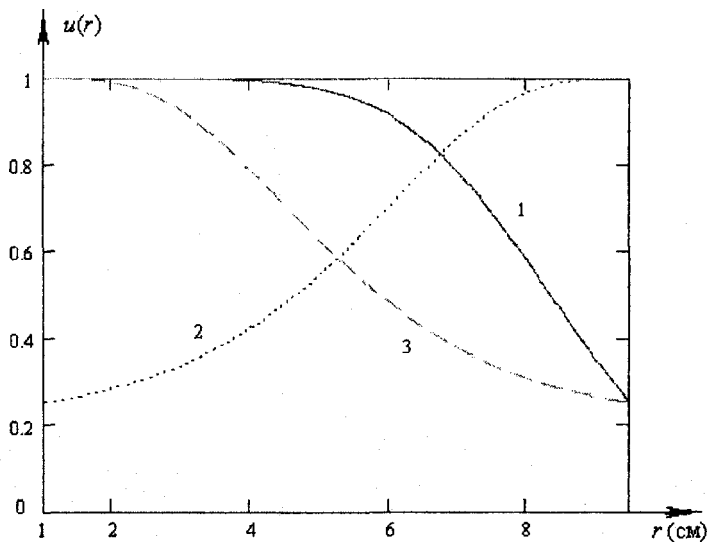


Рис. 2. Распределение сорбированных молекул CO_2 в радиальном патроне:
1 - течение наружу; 2 - течение внутрь; 3 - вспомогательная кривая

Из рисунка 2 видно, что при фильтрации воздуха в направлении уменьшения радиуса (снаружи - внутрь) толщина работающего слоя сорбента (кривая 2) меньше, чем при фильтрации изнутри - наружу (кривая 1). Причина в том, что цилиндрический слой большего радиуса при фиксированном объеме имеет меньшую толщину. Это приводит к более равномерному распределению сорбированных молекул и, как следствие, к более низкой их концентрации в толще продукта. Особенно хорошо это показывает вспо-

могательная кривая 3, полученная отражением кривой 2. Эффект выражен тем ярче, чем больше отношение $(R-r_0)/r_0$. Если оно близко к нулю, возвращаемся к практически плоскому случаю (рис. 3).

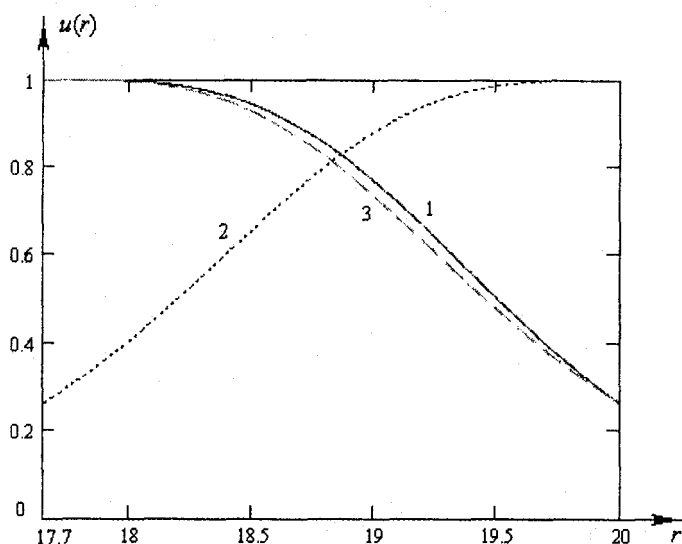


Рис. 3. Трансформация радиального случая в плоский при уменьшении кривизны цилиндрического слоя сорбента:
1 - течение наружу; 2 - течение внутрь; 3 - вспомогательная кривая

Напомним, что на первой и наиболее важной с точки зрения сорбционной активности стадии теплофизического процесса температура данного слоя сорбента пропорциональна $u(r)$. Поэтому реверс потока в радиальном патроне приводит (см. рис. 2) к существенному смягчению температурного режима, что не только повышает комфортность дыхания, но и препятствует послойному спеканию кислородсодержащего продукта, продлевая тем самым срок защитного действия аппарата.

Гармоничность такого способа фильтрации еще и в том, что наиболее нагруженные внешние слои продукта имеют большую поверхность теплоотдачи и близко расположены к окружающей среде, что смягчает температурный режим патрона.

Наряду со смягчением теплового режима патрона следует отметить еще одно положительное свойство реверса потока; аэродинамическое сопротивление дыханию при потоке очищаемого воздуха от периферии к центру будет меньшим, чем при традиционном направлении движения, так как продукты промежуточных реакций аналогично экзотермической энергии будут распределены по значительно большей активной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грекова С.П., Алейникова Г.М. Численный расчет полей концентрации примеси в цилиндрическом адсорбирующем канале с переменным расходом сорбата по его длине // Математические методы и АСУ в горно-спасательном деле. - № 43(66). - 1987. - 4 с.
2. Математическая модель рабочего процесса изолирующего шахтного респиратора / В.В. Пак, С.Г. Ехилевский, В.К. Овчаров, А.Э. Ильинский // Изв. вузов. Горный журнал. - 1994. Вып. 1. - С. 54-57.
3. Значения феноменологических параметров модели хемосорбции в регенеративных патронах шахтных респираторов / В.В. Пак, С.Г. Ехилевский, Э.Г. Ильинский, Е.И. Конопелько // Изв. вузов. Горный журнал. -1998. - № 11 - 12. - С. 108 - 112.