



УДК 66.011

**КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА
В ИЗОЛИРУЮЩЕМ ДЫХАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ****COMPUTER RESEARCH OF AIR REGENERATION PROCESS
IN THE REBREATHER****А.В.Майстренко, Н.В.Майстренко, О.И. Ерохин
A.V.Maystrenko, N.V.Maystrenko, O.I. Erokhin***Тамбовский государственный технический университет, Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106
Tambov state technical university, 106 Sovetskaja St, Tambov, 392000, Russia**e-mail: postmaster@amast.tstu.ru*

Аннотация. Представлена математическая модель процесса регенерации воздуха в изолирующем дыхательном аппарате (ИДА), описывающая процесс взаимодействия пластин регенеративным продуктом с воздушной смесью.

Приводятся результаты компьютерного исследования процесса регенерации воздуха в ИДА с использованием математической модели при различных режимах работы.

Resume. The mathematical model of air regeneration process in a rebreather, describing the process of interaction between of the plates with a regenerative product in the cartridge with air mixture is presented.

The results of computer research of air regeneration in rebreather using with a mathematical model under different operating conditions is provided.

Ключевые слова: изолирующий дыхательный аппарат, регенеративный продукт, математическая модель, вычислительный эксперимент.

Keywords: the rebreather, regenerative product, mathematical model, computational experiment.

Важным элементом системы защиты населения от вредных воздействий ядовитых веществ, образующихся при пожарах, в случаях химического поражения и т.п. являются изолирующие дыхательные аппараты (ИДА) – переносные средства защиты органов дыхания, глаз и кожи лица. В качестве источников кислорода и поглотителей диоксида углерода в ИДА с химически связанным кислородом используются в основном регенеративные продукты на основе надпероксида калия.

Устройство подобных ИДА таково, что при выдохе газозоветная смесь (ГВС) проходит через гофротрубку («вредный объем») и попадает в корпус патрона, охлаждается фильтром-теплообменником и проходит в пакет пластин. Регенерируемый воздух, проходя между пластинами, турбулизируется в разветвленных каналах и на поверхности регенеративного продукта, и реагирует с продуктом, при этом поглощается диоксид углерода и выделяется необходимый кислород. Очищенный воздух проходит через фильтрующую оболочку в дыхательный мешок. При вдохе воздух из дыхательного мешка вновь проходит через пакет пластин, охлаждается на фильтре-холодильнике, а затем поступает на вдох. Избыток дыхательной смеси сбрасывается из мешка через клапан избыточного давления в окружающую среду.

Наиболее ответственным узлом, входящим в состав самоспасателя, является регенеративный патрон (РП). Использование надпероксида калия в системах регенерации воздуха, выдыхаемого человеком, основано на взаимодействии надпероксида с диоксидом углерода в присутствии влаги, сопровождающееся выделением эквивалентного количества кислорода [1]. Моделируемый РП изготавливается в виде оболочки из вспененного полипропилена с газораспределительным устройством. Оболочка представляет собой обечайку, наполненную регенеративным продуктом и снабженную крышкой с центральным отверстием для присоединительного патрубка и ребрами жесткости, выполненными в виде угловых сварных швов. Пластины регенеративного продукта снабжены рифлями, образующими выступы, расположенные под углом к продольной оси пластины. При сборке в пакет соседние пластины развернуты относительно друг друга на 180°, таким образом, между выступами образуются газораспределительные каналы. За счет образования зазоров между пластинами уменьшается гидравлическое сопротивление регенеративного продукта, обеспечивается равномерная обработка за счет достижения равномерной толщины пластин и их пористости. Регенеративный продукт имеет максимально развернутую поверхность, легко доступную (практически к каждому кристаллу надпероксида калия) к взаимодействию с парами воды и диоксидом углерода.



Важнейшей характеристикой ИДА является время защитного действия (ВЗД), определяющая величину временного интервала, в течение которого будут выдержаны объемные концентрации диоксида углерода и кислорода, а также температура и сопротивление дыханию в заданных пределах. Согласно ГОСТ 53260-2009, объемная доля диоксида углерода на вдохе и в дыхательном мешке в течение всего времени работы не должна превышать 3% (об); объемная доля кислорода во вдыхаемой смеси должна быть не менее 20% (об) (в течение первых двух минут после включения допускается снижение доли кислорода до 17%); температура вдыхаемой из самоспасателя смеси при температуре окружающей среды (25 ± 2)°C не должна превышать 50°C.

Будем считать, что :

- режим течения ГВС в дыхательном мешке и вредном объеме представляет собой «идеальное смешение»,
- регенеративный патрон представляет собой реактор диффузионного типа.

Математическая модель процесса регенерации воздуха в ИДА, описывающая процесс взаимодействия регенеративных пластин в патроне с воздушной смесью, дополненная уравнениями материального баланса в дыхательном мешке и вредном объеме, а также начальными и граничными условиями для стадий вдоха и выдоха выглядит следующим образом [2]:

Уравнения материального баланса:

вдох

$$V^{\text{вдм}} \frac{dC^{\text{вдм}}}{dt} = -G^{\text{выд}} C^{\text{вдм}}$$

$$V^{\text{вдм}} \frac{dC_{O_2}^{\text{вдм}}}{dt} = -G^{\text{выд}} C_{O_2}^{\text{вдм}}$$

$$V^{\text{во}} \frac{dC^{\text{во}}}{dt} = G^{\text{выд}} C^{\text{П}} - G^{\text{выд}} C^{\text{во}}$$

$$V^{\text{во}} \frac{dC_{O_2}^{\text{во}}}{dt} = G^{\text{выд}} C_{O_2}^{\text{П}} - G^{\text{выд}} C_{O_2}^{\text{во}}$$

выдох

$$V^{\text{вдм}} \frac{dC^{\text{вдм}}}{dt} = G^{\text{выд}} C^{\text{П}}$$

$$V^{\text{вдм}} \frac{dC_{O_2}^{\text{вдм}}}{dt} = G^{\text{выд}} C_{O_2}^{\text{П}}$$

$$V^{\text{во}} \frac{dC^{\text{во}}}{dt} = G^{\text{выд}} C^{\text{вдм}} - G^{\text{выд}} C^{\text{во}} + G^{\text{выд}} C^{\text{л}}$$

$$V^{\text{во}} \frac{dC_{O_2}^{\text{во}}}{dt} = G^{\text{выд}} C_{O_2}^{\text{вдм}} - G^{\text{выд}} C_{O_2}^{\text{во}} - G^{\text{выд}} C_{O_2}^{\text{л}}$$

Начальные условия:

$$c(z,0) = c_0$$

$$c_{O_2}(z,0) = c_{O_2,0}$$

$$a(z,0) = 0$$

$$a_{O_2}(z,0) = a_{O_2,0}$$

$$C^{\text{вдм}}(0) = C^{\text{вдм}}_0$$

$$C_{O_2}^{\text{вдм}}(0) = C_{O_2,0}^{\text{вдм}}$$

$$T(z,0) = T_0$$

Граничные условия:

вдох

$$c(H,\tau) = c^{\text{вдм}}(\tau)$$

$$c_{O_2}(H,\tau) = c_{O_2}^{\text{вдм}}(\tau)$$

$$\frac{\partial c(0,\tau)}{\partial \tau} - w_x \frac{\partial c(0,\tau)}{\partial x} = -(1-\varepsilon) \frac{\partial a(0,\tau)}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial c_{O_2}(0,\tau)}{\partial \tau} - w_x \frac{\partial c_{O_2}(0,\tau)}{\partial x} = -(1-\varepsilon) \frac{\partial a_{O_2}(0,\tau)}{\partial \tau}$$

$$T(H,\tau) = T^{\text{вдм}}(\tau)$$

$$\frac{\partial T(0,\tau)}{\partial \tau} - w_x \frac{\partial T(0,\tau)}{\partial x} = -(1-\varepsilon) \frac{\partial a(0,\tau)}{\partial \tau}$$

выдох

$$c(0,\tau) = c^{\text{во}}(\tau)$$

$$c_{O_2}(0,\tau) = c_{O_2}^{\text{во}}(\tau)$$

$$\frac{\partial c(H,\tau)}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial c(H,\tau)}{\partial x} = -(1-\varepsilon) \frac{\partial a(H,\tau)}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial c_{O_2}(H,\tau)}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial c_{O_2}(H,\tau)}{\partial x} = -(1-\varepsilon) \frac{\partial a_{O_2}(H,\tau)}{\partial \tau}$$

$$T(0,\tau) = T^{\text{во}}(\tau)$$

$$\frac{\partial T(H,\tau)}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T(H,\tau)}{\partial x} = -(1-\varepsilon) \frac{\partial T(H,\tau)}{\partial \tau}$$

Вредный объем ИДА включает подмасочное пространство, гофротрубку и свободное от адсорбента пространство в патроне ИДА. Вредный объем нарастает по мере отработки регенеративного продукта. Приблизительно объем вредного пространства $V^{\text{во}}$ можно рассчитать по формуле:



$$V^{eo} = V_0^{eo} + \frac{\gamma}{d} \cdot V_{II} \cdot \frac{1}{H} \int_0^H \chi(x, t, T) dx,$$

где V_0^{eo} - начальный вредный объем, $\chi(x, t, T) = \frac{a(x, t)}{a_0(x, t, T)}$ - степень отработки регенеративного продукта, V_{II} - объем патрона, H - высота патрона.

При расчете температуры во вредном пространстве (на входе и на выходе в патрон при выдохе) должна быть учтена теплоотдача от стенок гофротрубки (S_1) и от торца патрона.

$$\begin{aligned} \widehat{T}^{ex} &= \frac{T^{vyd} \cdot (V^{vyd} - V^{eo}) + T^n \cdot V^{eo}}{V^{vyd}} \\ \widehat{T}^{eo} &= \frac{T^{vyd} \cdot V^{eo} + T^n \cdot (V^{vyd} - V^{eo})}{V^{vyd}} \\ A_1 &= \frac{\alpha_1 \cdot S_2 \cdot t_e}{c_p \cdot \rho_p \cdot (V^{eo} + V^{vyd})} \\ T^{ex} &= \frac{\widehat{T}^{ex} + A_1 \cdot T^{cp}}{1 + A_1} \\ T^{eo} &= \frac{\widehat{T}^{eo} + A_1 \cdot T^{cp}}{1 + A_1}, \end{aligned}$$

где $S_2 = S_1 + S$; $\alpha_1 = 10 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$; $T^{vyd} = 36,6^\circ \text{C}$

T^n находится как средняя за период вдоха температура на выходе из патрона:

$$T^n = \frac{1}{V} \int_{t_1+t_2}^{t_1} T(0, \tau) \cdot V(\tau) d\tau$$

где $V(\tau)$ - объемная скорость вдоха-выдоха.

$T^{\Delta m}$ находится как средняя за период выдоха температура на выходе из патрона с учетом потерь тепла в окружающую среду:

$$\begin{aligned} \widehat{T}^{\Delta m} &= \frac{1}{V} \int_{t_1}^{t_1+t_2} T(H, \tau) \cdot V(\tau) d\tau \\ A_2 &= \frac{\alpha_1 \cdot S_3 \cdot t_e}{c_p \cdot \rho_p \cdot V^{vyd}}, \\ T^{\Delta m} &= \frac{\widehat{T}^{\Delta m} + A_2 \cdot T^{cp}}{1 + A_2}, \end{aligned}$$

где S_3 - площадь поверхности дыхательного мешка.

Объемная скорость выдыхаемого воздуха периодически изменяется во времени по синусоидальному закону, описываемому уравнением

$$V(\tau) = \frac{\pi V^{vyd}}{2t_{vyd}} \sin\left(\frac{\pi \tau}{t_{vyd}}\right),$$

где V^{vyd} - объем вдоха-выдоха, м³; t_{vyd} - период вдоха-выдоха, с.

В общем случае, величина предельной емкости a_0 уменьшается с ростом температуры. Зависимость a_0 от температуры может быть выражена функцией $a_0 = 250 - 0.62 \cdot T$ [3].

В начальный период времени, пока температура не превышает 100 °С, можно считать величину предельной емкости независимой от температуры. Экспериментально значение данной величины было получено в [4]: $a_0 = 131$ л/л или $3,592 \times 10^{-3}$ моль/см³.

Исходя из стехиометрии целевой реакции определим значение предельного концентрации кислорода $a_{k_0} = 1,5 \cdot a_0$.



Коэффициент продольного перемешивания зависит от скорости течения ГВС и может быть рассчитан по формуле [3]:

$$D(x) = 0,39 \cdot 10^{-6} + 0,21 \cdot 10^{-6} \cdot W_{\text{см}} \quad \text{м}^2/\text{с}$$

Система дифференциальных уравнений в частных производных решалась с использованием двухслойной консервативной разностной схемы, которая так же, как и дифференциальные уравнения, удовлетворяют законам сохранения [5].

Экспериментальные исследования работоспособности ИДА проводились на установке «Искусственные легкие», где создаются заданные техническими условиями параметры ГВС, имитирующие параметры дыхания человека (частота дыхания, объем легочной вентиляции, концентрация диоксида углерода в выдыхаемом воздухе).

При испытаниях аппарата на установке ИЛ использовался режим с накоплением, ГВС из дыхательного мешка одновременно отсасывалась через штуцер и сбрасывалась через клапан избыточного давления, так что точная скорость выделения кислорода не фиксировалась.

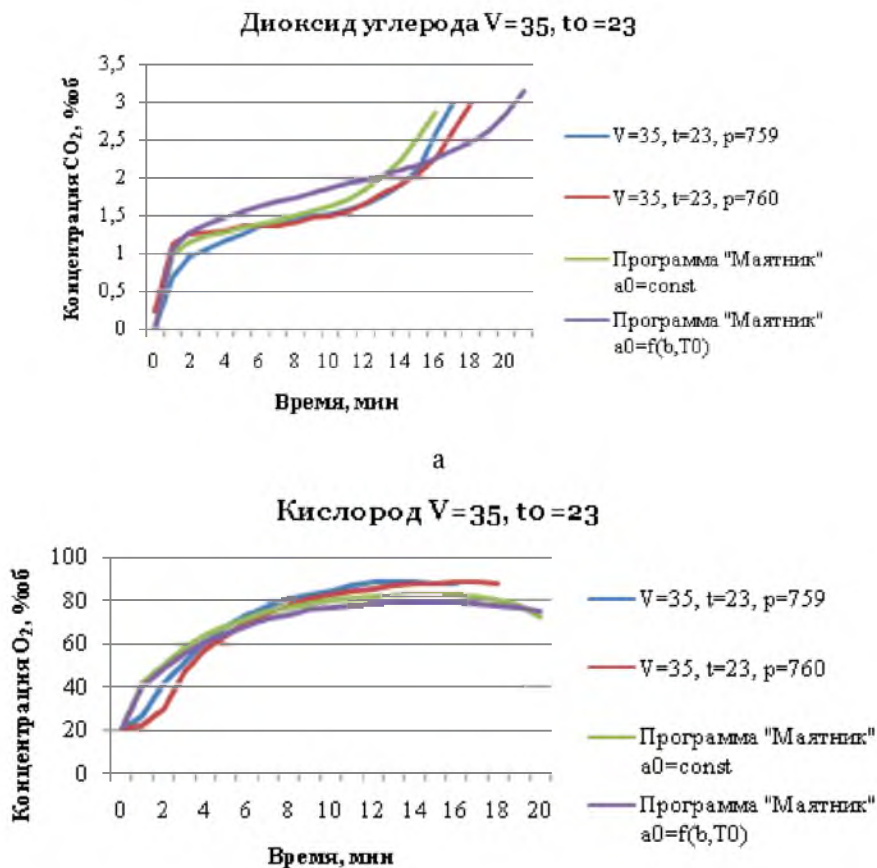
Испытания проводились при значениях легочной вентиляции 10, 30, 35, 60, 70 л/мин (соответствующие значения частоты дыхания 10, 18, 20, 25, 30 1/мин; значения входной концентрации CO_2 4% при нагрузках 30, 35, 60, 70 л/мин и 2,4% при нагрузке 15 л/мин).

Вычислительный эксперимент проводился при различных режимах нагрузки на аппарат и различных начальных условиях.

1. Номинальный режим: объем легочной вентиляции – 35 дм³/мин; частота дыхания – 20 мин⁻¹, температура окружающей среды $t = 23^\circ\text{C}$ (рис. 1 а, б, в).

2. Номинальный режим: объем легочной вентиляции – 35 дм³/мин; частота дыхания – 20 мин⁻¹, температура окружающей среды $t = 23^\circ\text{C}$ начальная температура ИДА - $t_0 = -5^\circ\text{C}$ (рис. 2 а, б, в).

3. Номинальный режим: объем легочной вентиляции – 35 дм³/мин; частота дыхания – 20 мин⁻¹, температура окружающей среды $t = 23^\circ\text{C}$ начальная температура ИДА - $t_0 = 60^\circ\text{C}$ (рис. 3 а, б, в).



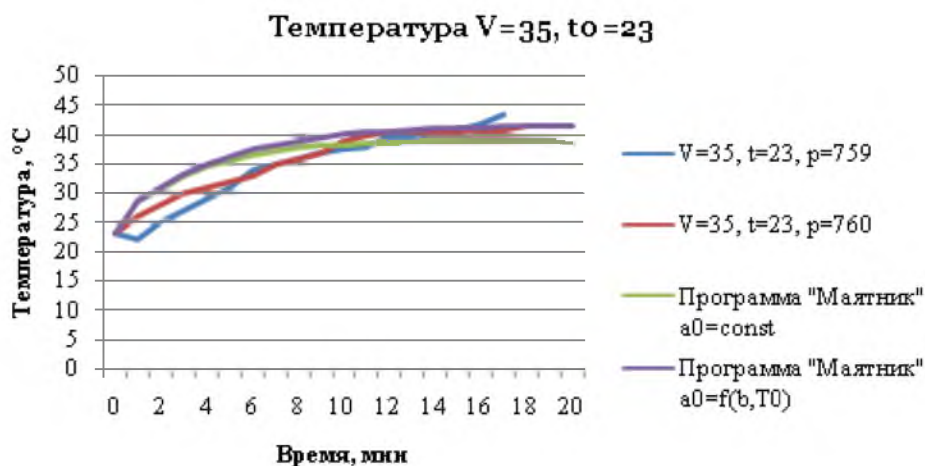
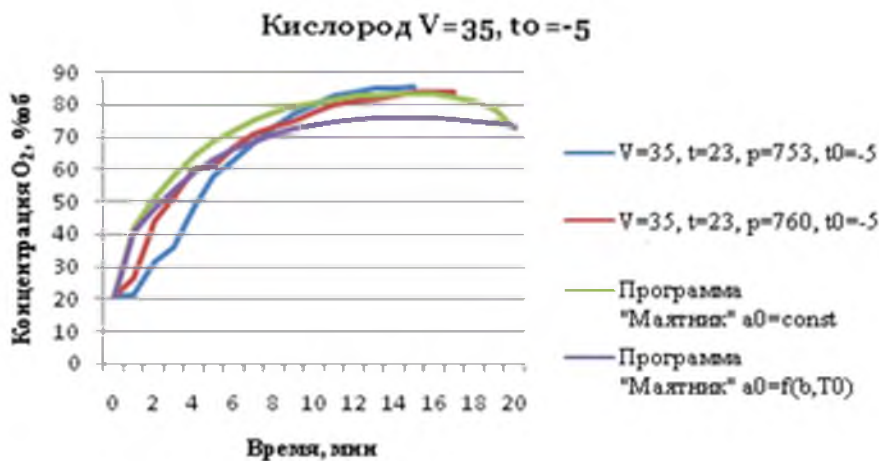
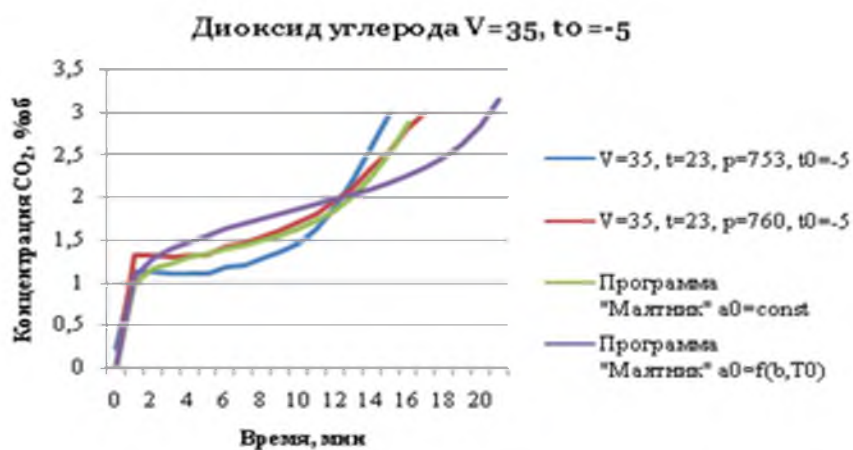


Рис. 1. Изменение параметров процесса регенерации воздуха c^{a0} , $c_{O_2}^{a0}$, T^{a0} в номинальном режиме при $t_0=23^{\circ}C$

Fig. 1. Change the parameters of the process of regeneration air c^{a0} , $c_{O_2}^{a0}$, T^{a0} in nominal mode when $t_0=23^{\circ}C$



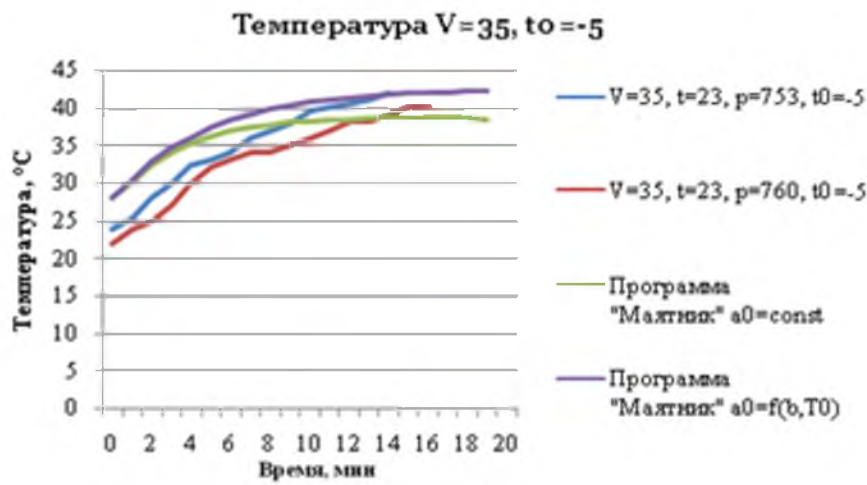
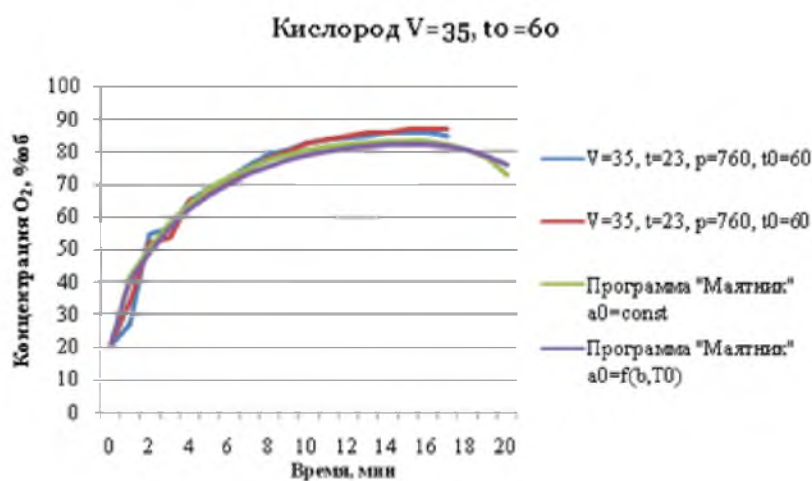
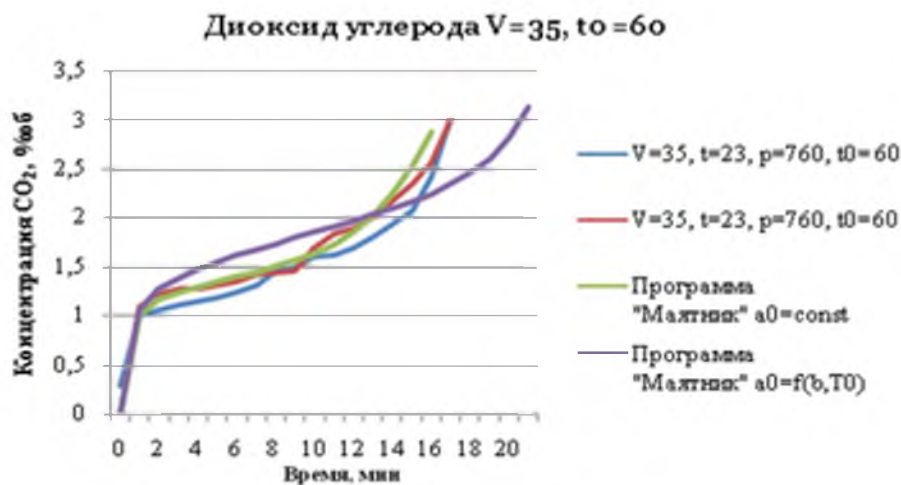


Рис. 2. Изменение параметров процесса регенерации воздуха $c^{вд}$, $c_{O_2}^{вд}$, $T^{вд}$ в номинальном режиме при $t_0=-50C$

Fig. 2. Change the parameters of the process of regeneration air $c^{вд}$, $c_{O_2}^{вд}$, $T^{вд}$ in nominal mode when $t_0=-50C$



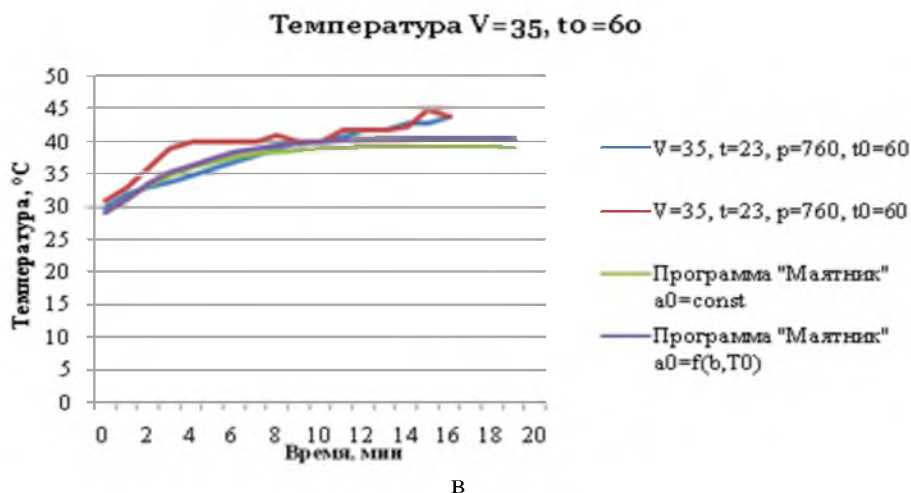


Рис. 3. Изменение параметров процесса регенерации воздуха $c^{e0}, c_{O_2}^{e0}, T^{e0}$ в номинальном режиме при $t_0=600C$

Fig. 3. Change the parameters of the process of regeneration air $c^{e0}, c_{O_2}^{e0}, T^{e0}$ in nominal mode when $t_0=600C$

Для наделения математической модели количественными характеристиками конкретного процесса регенерации в ИДА КС-15 была решена задача параметрической идентификации модели неизвестного вектора кинетических коэффициентов $\beta = \{\beta, \beta_{O_2}\}$, который соответствует решению задачи $\beta^* = \arg \min F(\beta)$, где $F(\beta) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N (c_{k_n}(H, \tau_n) - (c_{k_n}^e(H, \tau_n)))^2$, K – количество экспериментальных выходных кривых концентраций компонент смеси, N – количество замеров концентраций для одной выходной кривой; τ_n – значения времени, в которых фиксируются расчетные и экспериментальные значения. Для нахождения значений вектора β^* построена процедура безусловной оптимизации на основе метода Нелдера-Мида. Были получены значения коэффициентов скоростей реакции $\beta = 9,3 c^{-1}, \beta_{O_2} = 12,09 c^{-1}$.

Отклонения расчетных и экспериментальных данных не превышают 11,5%, что согласуется с погрешностью экспериментов. Расхождение расчетной и экспериментальной кривой при низких нагрузках объясняется неравномерной скоростью движения воздуха по сечению патрона, что может быть учтено при использовании двумерной модели и расчете профиля скоростей. При больших нагрузках расхождение расчетных и экспериментальных данных может быть объяснено недостаточно полным учетом особенностей кинетики поглощения CO_2 при высоких температурах (при начале разложения продукта).

График степени отработки также согласуется с данными опыта. Из-за невысокой скорости течения ГВС практически весь диоксид углерода поглощается «лобовым слоем» регенеративного продукта. Таким образом, к концу эксперимента фронтальные слои отработали практически полностью и по диоксиду углерода и по кислороду в то время, как противоположные слои отработали лишь на 70% и 80% соответственно.

Список литературы References

1. Вольнов, И.И. Перекисные соединения щелочных металлов / И.И. Вольнов // М. : Наука, 1980. – 160 с.
Vol'nov, I.I. Perekisnye soedinenija shhelochnyh metallov / I.I. Vol'nov // M. : Nauka, 1980. – 160 s.
2. Майстренко А.В., Майстренко Н.В., Ерохин О.И. Моделирование изолирующих дыхательных аппаратов на химически связанном кислороде // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия История. Политология. Экономика. Информатика. 2014. № 1 (172). Вып. 29/1. С. 81-87



Majstrenko A.V., Majstrenko N.V., Erohin O.I. Modelirovanie izolirujushhix dyhatel'nyh ap-paratov na himicheski svjazannom kislorode // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Serija Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. 2014. № 1 (172). Vyp. 29/1. S. 81-87

3. Плотникова С.В. Кинетика и математическое моделирование процессов массо- и теплопереноса в изолирующих дыхательных аппаратах : дис. канд. техн. наук : 05.17.08. – Тамбов, 1994. – 137 с.

Plotnikova S.V. Kinetika i matematicheskoe modelirovanie processov masso- i teplopereno-sa v izolirujushhix dyhatel'nyh apparatah : dis. kand. tehn. nauk : 05.17.08. – Tambov, 1994. – 137 s.

4. Холодильн Н.Ю. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса регенерации воздуха с использованием регенеративного продукта на матрице: дис. канд. техн. наук : 05.17.08. – Тамбов, 2006. – 174 с.

Holodilin N.Ju. Kinetika i apparaturno-tehnologicheskoe oformlenie processa regeneracii vozduha s ispol'zovanijem regenerativnogo produkta na matrice: dis. kand. tehn. nauk : 05.17.08. – Tambov, 2006. – 174 s.

5. Тихонов А.Н, Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Издательство МГУ, 1999. – С. 799.

Tihonov A.N, Samarskij A.A. Uravnenija matematicheskoj fiziki. M.: Izdatel'stvo MGU, 1999. – S. 799.