Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Р. Самборук, Моделирование работы газогенераторов фильтрационного типа,
Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 2006, выпуск 42, 140–146

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu425>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.197.217.227

26 апреля 2023 г., 13:28:34

5. Avetisov V.A., Bikulov A.Kh., Kozyrev S.V., Osipov V.A. *p*-Adic Models of Ultrametric Diffusion Constrained by Hierarchical Energy Landscapes // J.Phys. A: Math. Gen., 35 (2002) 177.
6. Avetisov V.A., Bikulov A.Kh., Kozyrev S.V., Application of *p*-adic analysis to models of spontaneous breaking of replica symmetry // Journal of Physics A, 1999. V.32. P. 8785.
7. Avetisov V.A., Bikulov A.Kh., Osipov V.A. *p*-adic description of characteristic relaxation in complex systems // J. Phys. A: Math. Gen. 36. 2003. 4239.

Поступила 15.01.2006 г.

УДК 517.958: 532.546

А.Р. Самборук

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ТИПА

Рассмотрена математическая модель работы фильтрационного газогенератора, основанная на предположении о конвективном переносе тепла, обусловленного поступательным движением слоя реакционноспособного расплава продуктов горения под действием перепада давления выделившихся газов.

Единственным способом, позволяющим получать газообразные продукты с температурой, близкой к начальной температуре заряда, является режим спутной фильтрации продуктов горения через несгоревшую часть пористого заряда [1-3].

Такой режим работы реализуется в газогенераторах фильтрационного типа [4-6]. Наиболее значительное влияние на параметры работы подобных газогенерирующих устройств (ГГУ) оказывает величина пористости газопроницаемого заряда и фазовый состав продуктов горения, образующихся при горении газогенерирующего состава (ГГС). Именно эти параметры определяют механизм передачи тепла и условия фильтрации продуктов горения через несгоревшую часть заряда.

Ранее уже были рассмотрены математические модели газовыделения с высокой и средней пористостью заряда с учетом и без учета фильтрационных затруднений [7-9].

Результаты анализа этих моделей фильтрационных генераторов, основанных на предположении о кондуктивном механизме передачи тепла в волне горения, показали, что характер изменения основных характеристик такого газогенератора (распределения давления по длине заряда, изменения скорости горения и давления в продуктах, а также максимального давления) не соответствуют экспериментальным данным. Поэтому была предложена совершенно иная модель горения заряда в фильтрационном газогенераторе, основанная на предположении о конвективном переносе тепла. Причем конвективный перенос тепла, прежде всего, связан с поступательным движением слоя реакционноспособного расплава легкоплавкого продукта разложения одного из исходных реагентов под действием перепада давления выделяющегося газа перед - и за слоем расплава. Для существования такого режима необходимо выполнение следующего условия: скорость тепловыделения за счет экзотермической реакции взаимодействия расплава с исходной шихтой должна быть выше скорости отвода тепла от расплава в непрогретую шихту. Физически это означает, что при попадании расплава в непрогретую шихту не происходит его застывания. Фильтрующийся инертный газ не может обеспечить опережающий прогрев исходной шихты, поэтому не может быть причиной реализации конвективного режима горения газогенерирующего заряда.

Рассматривается следующая модель газогенератора, изображенная на рис. 1.

В трубчатый газогенератор, закрытый с одного из торцов газонепроницаемой крышкой, помещается исходная шихта с плотностью ρ_0 и пористостью m . Протяженность области, занятой шихтой, равна l , а свободного объема – l_0 . Инициирование процесса горения производится со стороны крышки, после чего по исходной смеси распространяется фронт реакции. Считается, что в результате взаимодействия исходных реагентов выделяется тепло (Q – на грамм смеси) и образуются конденсированные продукты ($1-p$ грамм на грамм смеси), создающие неподвижный пористый каркас с пористостью m_1 , а также инертный газ (p грамм на грамм смеси).

Предполагается, что температура горения выше температуры плавления продукта разложения одного из исходных реагентов, но ниже температуры плавления конечных продуктов реакции, создающих неподвижный пористый каркас. Следует отметить, что тепло выделяется при взаимодействии этого расплава с другими компонентами исходной шихты. Это означает, что экзотермическая реакция начинается в том месте шихты, куда проник расплав. Так как точное место выделение газа из экспериментов не известно, то будем считать, что газ выделяется за слоем расплава. В результате выделения газа его давление внутри газогенератора становится больше внешнего. Из-за разности давлений газа внутри газогенератора и внешней средой газ начинает выходить наружу, фильтруясь через слой расплава и несгоревшую часть заряда (спутная фильтрация). Считается, что фильтрация газа через слой расплава подчиняется закону Дарси. Этот же перепад давлений обеспечивает перемещение слоя расплава, определяющего скорость движения фронта.

Основная масса газа фильтруется наружу, а часть остается в сгоревшей части. В соответствии с результатами исследований процесса многофазной фильтрации основное сопротивление течению газа оказывает та область перед зоной газовыделения, где имеется расплав. Это предположение находится в соответствии с экспериментальными данными [10], где было показано, что давление в несгоревшей части заряда практически равно внешнему (т.е. давлению в газоприемной камере или атмосферному). В соответствии с экспериментальными данными также будем считать, что отсутствует распределение давления газа в сгоревшей части заряда.

Для математического описания процесса конвективного горения пиротехнического газогенерирующего заряда необходимо совместное рассмотрение уравнения баланса массы газа в сгоревшей части образца и уравнения, связывающего скорость фронта реакции с перепадом давлений и длиной слоя расплава, а также уравнения состояния газа. Так как предполагается, что механизм распространения зоны превращения конвективный, а скорость движения слоя расплава и есть скорость движения фронта реакции, то для решения поставленной задачи (определения зависимости скорости горения от времени) достаточно установить закон изменения давления примесного газа за зоной реакции. Тогда процесс горения нужно анализировать в масштабе длины слоя шихты. В этом масштабе не только распределение давления, но и распределения температуры T и глубины превращения h в образце носят ступенчатый характер: $T = T_{in}, h = 0$ – в исходном веществе; $T = T_c = T_{in} + Qu r_0 / (ucr_0 - c_g G_g), h = 1$ – в конденсированных продуктах реакции, где T_{in} – исходная температура заряда; T_c – температура горения, u – скорость распространения фронта реакции (расплава); c_g – теплоемкость газа; c – теплоемкость исходного заряда; G_g – массовый расход газа через слой расплава, отнесенный к единице площади поперечного сечения заряда.

Тогда система уравнений, описывающая процесс конвективного горения пористого заряда, имеет вид:

$$\frac{dM_g}{dt} = ur_0(1-m)n - r_{gm}m_m V_g, \quad (1)$$

$$\frac{dl_1}{dt} = u = u_{in} + u_{conv} = u_{in} + \frac{k_{fm}}{\Delta_m} (P_{g,c} - P_{in}), \quad (2)$$

$$M_g = l_0 r_{g,c} + (l_1 - l_0) r_{g,c} m_1, \quad (3)$$

$$V_g = k_{fg} \frac{(P_{g,c} - P_{in})}{\Delta_m}, \quad (4)$$

Р и с. 1. Схематическая модель газогенератора.

$$r_{g,c} = \frac{P_{g,c} m}{RT_c}, T_c = T_{in} + Qu r_0 / (uc r_0 - c_g G_g), G_g = r_{gm} m_m V_g, \quad (5)$$

$$\Delta_m = \Delta_{in} + k_1 (l_1 - l_0), k_{fg} = \frac{k_{f0}}{1 + k_2 (l_1 - l_0)^2}. \quad (6)$$

Начальные условия:

$$t = 0 : l_1 = l_0; P_{g,c} = P_{in}. \quad (7)$$

Здесь: M_g – мгновенное значение массы газа за фронтом реакции, отнесенное к единице площади поперечного сечения заряда; l_0 – длина области, незаполненной шихтой; l_1 – расстояние от газонепроницаемой крышки до фронта реакции; t – время; u – скорость фронта реакции; u_{in} – скорость распространения фронта после завершения этапа зажигания; u_{conv} – переменная составляющая скорости горения; k_{fm} – коэффициент фильтрации расплава; V_g – скорость фильтрации газа через слой расплава; Δ_m – толщина слоя расплава; Δ_{in} – толщина слоя расплава после завершения этапа зажигания; k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности; k_{fg} – коэффициент фильтрации газа через слой расплава; k_{f0} – начальное значение коэффициента фильтрации газа; r_0, m – плотность и пористость исходной шихты; m_1 – пористость конденсированных продуктов; n – масса газа, образующаяся при сгорании одного грамма шихты; m – молекулярный вес газа; R – универсальная газовая постоянная; $P_{g,c}$ – давление газа за фронтом реакции; $r_{g,c}$ – плотность газа за фронтом реакции; P_{in} – начальное давление газа в реакторе; r_{gm} – средняя плотность газа в области, где есть расплав; $P_{g,max}$ – давление газа за фронтом реакции, рассчитанное в предположении, что весь выделяющийся газ остается в порах сгоревшего заряда; T_{in} – начальная температура; T_c – температура конденсированных и газообразных продуктов реакции при $l < l_1$.

В соответствии с данными экспериментов [10] будем полагать, что максимальное давление, которое может создать в порах образца выделяющийся газ $P_{g,max}$ намного больше как начального, так и текущего значения давления в конденсированных продуктах $P_{g,c}$. Последнее условие означает, что основная масса выделяющегося в процессе горения заряда газа успевает фильтроваться наружу:

$$r_0 (1-m)nRT_c / m_1 = P_{g,max} \gg P_{in}, r_0 (1-m)nRT_c / m_1 = P_{g,max} \gg P_{g,c}.$$

При записи системы (1) – (6) полагалось, что в соответствии с подходами, разработанными в теории многофазной фильтрации [11], движение слоя расплава и газа в трехфазной области подчиняется линейной форме закона Дарси: $V_f = k_f \frac{\partial P}{\partial x} \approx k_f \frac{\Delta P}{\Delta x} = k_f \frac{P_{gc} - P_{in}}{\Delta_m}$, где V_g – скорость фильтрации, k_f – коэффициент фильтрации, ΔP – перепад давления в области фильтрации, Δx – длина области фильтрации. Также предполагалось, что толщина слоя расплава Δ_m пропорциональна длине сгоревшей части заряда, причем из физических соображений ясно, что сам коэффициент пропорциональности обратно пропорционален пористости заряда m и пропорционален количеству расплава, образующемуся при сгорании одного грамма шихты n_m . Также известно [12], что значение коэффициента фильтрации газа в многофазной области зависит от насыщенности этой области жидкостью. Т.к. насыщенность возрастает по мере горения заряда, то этот факт был учтен при выборе формы записи для коэффициента фильтрации газа k_{fg} . Кроме того, проведенные нами расчеты (результаты которых будут приведены ниже) показали, что при постоянном значении коэффициента фильтрации не удастся получить такие зависимости скорости горения u и давления газа $P_{g,c}$ от времени, которые были обнаружены при экспериментальных исследованиях закономерностей горения заряда в фильтрационном газогенераторе [10, 13]. Также важно отметить следующее. В соответствии с предложенной моделью горения скорость фронта реакции слабо зависит от температуры конечных продуктов

T_c . Поэтому при дальнейших исследованиях полагалось $T_c = \text{const} = T_{in} + Q/(1-n)$, что отвечает полному истечению образующегося газа из газогенератора, а r_{gm} определяли по формуле

$$r_{gm} = \frac{(P_{gc} + P_{in})m}{2RT_{med}}; T_{med} = (T_m + T_c)/2 \approx T_c. \quad (8)$$

С помощью (2) – (6), (8) уравнение (1) можно привести к следующему виду:

$$\left(\frac{l_0}{m_1} + l_1 - l_0 \right) \frac{dP_{g,c}}{dt} = u(P_{\max} - P_{g,c}) - k_{f0} \frac{m_m}{2m_1} \frac{1}{\Delta_m} \frac{P_{g,c}^2 - P_{in}^2}{1 + k_2(l_1 - l_0)^2}. \quad (9)$$

Для удобства численного анализа, уменьшения числа независимых переменных и общности полученных результатов система (2) – (7), (9) была приведена к безразмерному виду:

$$\left(\frac{\bar{l}_0}{m_1} + \bar{l}_1 - \bar{l}_0 \right) \frac{d\bar{P}_{g,c}}{dt} = \bar{u}(1 - \bar{P}_{g,c}) - \bar{K}_f \frac{m_{cp}}{2m_1} \frac{\bar{\Delta}_m(\bar{l})}{\bar{\Delta}_m(\bar{l}_1)} \frac{\bar{P}_{g,c}^2 - \bar{P}_{in}^2}{1 + \bar{K}_2(\bar{l}_1 - \bar{l}_0)^2}, \quad (10)$$

$$\bar{u} = \bar{u}_{in} + \frac{\bar{\Delta}_m(\bar{l})}{\bar{\Delta}_m(\bar{l}_1)} (\bar{P}_{g,c} - \bar{P}_{in}), \quad (11)$$

$$\bar{\Delta}_m(\bar{l}_1) = \bar{\Delta}_{in} + \bar{K}_1(\bar{l}_1 - \bar{l}_0), \quad (12)$$

$$\bar{l}_1(t) = \bar{l}_0 + \int_0^t \bar{u} dt. \quad (13)$$

Начальные условия:

$$t = 0: \bar{l}_1 = \bar{l}_0; \bar{P}_{g,c} = \bar{P}_{in}. \quad (14)$$

Используемые безразмерные переменные и параметры:

$$\begin{aligned} \bar{P}_{gc} &= \frac{P_{g,c}}{P_*}, & P_* &= P_{g\max}, & t &= \frac{t}{t_*}, & t_* &= \frac{L}{k_{fm} P_{g\max} / \Delta_m(L)}, & \bar{\Delta}_m(L) &= \bar{\Delta}_{in} + \bar{K}_1, & \bar{l}_1 &= \frac{l_1}{L}, \\ \bar{l}_0 &= \frac{l_0}{L}, & \bar{l}_1 &= \frac{l_1}{L}, & \bar{\Delta}_m(l_1) &= \frac{\Delta_m}{L}, & \bar{\Delta}_{in} &= \frac{\Delta_{in}}{L}, & \bar{u} &= \frac{u}{L/t_*}, & \bar{u}_{in} &= \frac{u_{in}}{L/t_*} \bar{K}_f = \frac{k_{f0}}{k_{fm}}, \\ \bar{K}_1 &= k_1, & \bar{K}_2 &= k_2 L^2, & \bar{P}_{in} &= \frac{P_{in}}{P_*}. \end{aligned}$$

Область изменения искомых величин и параметров:

$$\bar{P}_{in} < \bar{P}_{g,c} < 1, \quad 0 < \bar{u} < 1 + \bar{u}_{in}, \quad \bar{l}_0 < \bar{l}_1 < 1 + \bar{l}_0.$$

Анализ безразмерной системы (10) – (14) проводили численным методом.

На основании предварительных расчетов стало ясно, что такой характер зависимостей, который наблюдается в эксперименте [10], может обеспечить только учет зависимости коэффициента фильтрации от длины сгоревшего слоя. В основной серии проведенных расчетов определялась зависимость основных характеристик работы газогенератора от величины коэффициента фильтрации $\bar{K}_f$ и начальной скорости горения состава $\bar{u}_{in}$. Результаты некоторых расчетов приведены на рис. 2, 3.

Выбор $\bar{K}_f$ и $\bar{u}_{in}$ в качестве варьируемых параметров не случаен, а основан на том факте, что коэффициент фильтрации существенно меняется при изменении плотности шихты и величины гранул [14, 15], а также экспериментально обнаруженном факте влияния условий инициирования на весь процесс горения пористого заряда в фильтрационном газогенераторе [16]. Изменение параметра $\bar{K}_2$ при постоянном значении $\bar{K}_f$ можно трактовать как увеличение длины заряда при постоянном значении всех остальных определяющих величин. Значения параметра $\bar{l}_0$ не оказывают существенного влияния на процесс горения, если $\bar{l}_0 \ll 1$. В соответствии с экспериментальными данными при численных расчетах $\bar{l}_0$ принималось равным 0,01±0,02. Т.к. количественные данные о величине начальной толщине слоя расплава в [16] отсутствуют, то в расчетах принимали $\bar{\Delta}_{in} = 0,01$.

Р и с. 2. Зависимость давления газа за слоем расплава $\bar{P}_{g,c}$; давления газа, рассчитанного по формуле (17); $\bar{P}_t$, местоположения фронта реакции $\bar{l}_1$; толщины слоя расплава $\bar{\Delta}_m$ (a); скорости горения $\bar{u}$, скорости образования газа $\bar{G}_{g0}$, скорости его фильтрации через слой расплава $\bar{G}_g$, массы газа в сгоревшей части заряда $\bar{M}_g$ (b) от времени:

$$\bar{K}_f = 50, \bar{K}_1 = 0,04, \bar{K}_2 = 40, \bar{l}_0 = 0,01, \bar{u}_{in} = 0,02, \bar{\Delta}_{in} = 0,01, \bar{\Delta}_m(\bar{l}) = 0,05, m_1 = 0,7, m_{cp} = 0,5$$

Р и с. 3. Зависимость давления газа за слоем расплава $\bar{P}_{g,c}$; давления газа, рассчитанного по формуле (17); $\bar{P}_t$, местоположения фронта реакции $\bar{l}_1$; толщины слоя расплава $\bar{\Delta}_m$ (a); скорости горения $\bar{u}$, скорости образования газа $\bar{G}_{g0}$, скорости его фильтрации через слой расплава $\bar{G}_g$, массы газа в сгоревшей части заряда $\bar{M}_g$ (b) от времени:

$$\bar{K}_f = 800, \bar{K}_1 = 0,04, \bar{K}_2 = 40, \bar{l}_0 = 0,01, \bar{u}_{in} = 0,02, \bar{\Delta}_{in} = 0,01, \bar{\Delta}_m(\bar{l}) = 0,05, m_1 = 0,7, m_{cp} = 0,5$$

С помощью численных расчетов была определена зависимость времени полного сгорания заряда t_c и максимального давления газа $\bar{P}_{g \max}$ от величины коэффициента фильтрации (рис. 4, 5).

Анализируя приведенные рисунки, можно отметить следующее: с ростом коэффициента фильтрации время сгорания заряда увеличивается, начальный нестационарный этап выхода на рабочий режим при используемых значениях определяющих параметров составляет малую часть общего времени горения заряда при всех значениях коэффициента фильтрации, используемых в расчетах. На начальном этапе горения реализуется квазистационарный режим, когда скорость образования газа $\bar{G}_{g0} = m_1 \bar{u}$ равна скорости его фильтрации из газогенератора $\bar{G}_g$.

На основании выявленных особенностей процесса горения был разработан приближенный метод расчета максимального давления, достигаемого внутри камеры газогенератора.

Для этого было использовано допущение о квазистационарности процесса горения пористого заряда. В соответствии с этим подходом полагается, что в каждый момент времени, т.е. для каждого значения $\bar{l}_1$ имеет место равенство скорости образования газа $\bar{G}_{g0} = m_1 \bar{u}$ и скорости его фильтрации через слой расплава $\bar{G}_g$, т.е.

$$\bar{G}_{g0} = \bar{G}_g. \quad (15)$$

Подставляя в (10) значения $\bar{u}$ из (11)

$$\bar{u} = \bar{u}_{in} + \frac{\bar{\Delta}_m(\bar{L})}{\bar{\Delta}_m(\bar{l}_1)} (\bar{P}_{g,c} - \bar{P}_{in}),$$

получим следующее квадратное уравнение для определения $\bar{P}_{gc}$:

$$\bar{P}_{gc}^2 - \frac{\bar{P}_{g,c}}{M} - \frac{\bar{P}_{in}}{M} \left(M\bar{P}_{in} + \frac{\bar{\Delta}_m(\bar{l}_1)}{\bar{\Delta}_m(\bar{L})} \frac{\bar{u}_{in}}{\bar{P}_{in}} - 1 \right) = 0, \quad (16)$$

где $M = \bar{K}_f \frac{m_{cp}}{2m_1} \frac{1}{1 + \bar{K}_2(\bar{l}_1 - \bar{l}_0)^2}$.

Для того чтобы различать значения давления за слоем расплава, полученные численным методом и с помощью решения уравнения (16), обозначим значения $\bar{P}_{gc}$ полученные с помощью уравнения (16) через $\bar{P}_t$. Тогда для расчета $\bar{P}_t$ имеем следующее выражение:

$$\bar{P}_t = -\frac{1}{2M} \left(1 + \sqrt{1 + 4M\bar{P}_{in} \left(M\bar{P}_{in} + \frac{\bar{\Delta}_m(\bar{l}_1)}{\bar{\Delta}_m(\bar{L})} \frac{\bar{u}_{in}}{\bar{P}_{in}} - 1 \right)} \right). \quad (17)$$

Выражение (17) позволяет для каждого выбранного значения $\bar{l}_1$ рассчитать величину $\bar{P}_t$, а затем и значения остальных переменных. Значения $\bar{P}_t$, вычисленные по формуле (17), приведены на рисунках 2, 3. Как видно из рисунков, хорошее совпадение между $\bar{P}_{g,c}$ и $\bar{P}_t$ наблюдается на начальных этапах процесса горения, причем область совпадения расширяется при увеличении коэффициента фильтрации. Формула (17) дает завышенные значения давления газа и поэтому применима для определения $\bar{P}_{g \max} = \bar{P}_t (\bar{l}_1 = 1 + \bar{l}_0)$.

Зависимость давления газа за слоем расплава соответствует экспе-

Р и с. 4. Зависимость времени полного сгорания пористого заряда t_c от величины коэффициента фильтрации $\bar{K}_f$:

1 - $\bar{K}_1 = 0$, $\bar{K}_2 = 0$, $\bar{\Delta}_m(\bar{L}) = 0,01$; 2 - $\bar{K}_1 = 0,05$, $\bar{K}_2 = 0$;
3 - $\bar{K}_1 = 0,05$, $\bar{K}_2 = 20$; 4 - $\bar{K}_1 = 0,05$, $\bar{K}_2 = 40$; $m_1 = 0,7$;
 $m_{cp} = 0,5$; $\bar{l}_0 = 0,01$, $\bar{u}_{in} = 0,02$, $\bar{\Delta}_m = 0,01$, $\bar{\Delta}_m(\bar{L}) = 0,05$

Р и с. 5. Зависимость максимального давления газа $\bar{P}_{g \max}$ внутри камеры газогенератора от величины коэффициента фильтрации $\bar{K}_f$:

1 - $\bar{K}_1 = 0$, $\bar{K}_2 = 0$, $\bar{\Delta}_m(\bar{L}) = 0,01$; 2 - $\bar{K}_1 = 0,05$, $\bar{K}_2 = 0$;
3 - $\bar{K}_1 = 0,05$, $\bar{K}_2 = 20$; 4 - $\bar{K}_1 = 0,05$, $\bar{K}_2 = 40$; $m_1 = 0,7$; $m_{cp} = 0,5$;
 $\bar{l}_0 = 0,01$, $\bar{u}_{in} = 0,02$, $\bar{\Delta}_m = 0,01$, $\bar{\Delta}_m(\bar{L}) = 0,05$

риментальным данным. Использование рассматриваемой модели и формул для расчета позволяет определить максимальный уровень внутрикамерного давления по длине заряда ГГС и провести прочностные расчеты корпуса газогенератора фильтрационного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев В.К. Низкотемпературный самораспространяющийся пиролиз конденсированных систем // Первый Всесоюзный симпозиум по макроскопической кинетике и химической газодинамике. Октябрь, 1984. Алма-Ата. Тезисы докладов. Т. II. Часть I. С. 92-93.
2. Патент РФ № 2050966. Способ получения газов и устройство для его осуществления. Новиков А.А., Самборук А.Р. Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений РФ 27 декабря 1995 г.
3. Самборук А.Р. Способ генерации холодных газов при горении пористых систем // Вестник Самарск. госуд. техн. ун.-та. Серия: Технические науки. Вып. 32. 2005. С. 101-109.
4. А.с. № 1254827 (СССР). Газогенератор. Григорьев В.К., Чесноков В.А., Самборук А.Р., Новиков А.А. и др. Зарегистрировано в Гос. реестре изобретений СССР 01 мая 1986 г.
5. А.С. № 1376689 (СССР). Газогенератор. Григорьев В.К., Чесноков В.А., Самборук А.Р., Новиков А.А. и др. Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений СССР. 22 октября 1987 г.
6. А.С. № 271589 (СССР). Газогенератор. Григорьев В.К., Самборук А.Р., Чесноков В.А. и др. Зарегистрирован в Гос. реестре изобретений СССР 01 марта 1988 г.
7. Самборук А.Р., Сеплярский Б.С., Ивлева Т.П., Макаренко А.Г., Амосов А.П. Разработка и анализ математической модели газовыделения в газогенераторе с высокой пористостью заряда // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Всеросс. научн. конф. Часть 2. Самара: СамГТУ, 2004. С. 229-239.
8. Сеплярский Б.С., Самборук А.Р., Амосов А.П., Ивлева Т.П., Макаренко А.Г. Моделирование и численное решение задачи о фильтрационном горении высокопористого газогенерирующего заряда // Вестник Самарск. госуд. техн. ун.-та. Сер.: Математические науки. Вып. 3. 2004. С. 89-97.
9. Самборук А.Р., Амосов А.П., Ивлева Т.П., Макаренко А.Г., Сеплярский Б.С. Моделирование работы газогенератора с пиротехническим зарядом средней пористости с учетом фильтрационных затруднений // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Второй Всеросс. научн. конф. Часть 2. Самара: СамГТУ, 2005. С. 24-34.
10. Самборук А.Р. Исследование процессов горения и разработка пиротехнических устройств для генерации газов высокой чистоты и пониженной температуры // Процессы горения и взрыва физикохимии и технологии неорганических материалов. Труды Всеросс. конф. Москва, 2002 года. С. 343-346.
11. Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988. С. 9-52.
12. Шкадинский К.Г., Струнина А.Г., Фирсов А.Н., Демидова Л.Д., Барзыкин В.В. Математическое моделирование горения пористых малогазовых составов. // Физика горения и взрыва 1991. Т.27, №5. С.84-91.
13. Гусаченко Л.К., Зарко В.Е., Серебряков Ю.Ю., Карасев В.В., Шандаков В.А. Конвективный режим фильтрационного горения энергетических материалов в спутном потоке собственных продуктов сгорания // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37. № 5. С. 55-65.
14. Переход горения конденсированных систем во взрыв/ А.Ф. Беляев, В.К. Бобылев, А.А. Сулимов и др. М.: Наука, 1973. 292 с.
15. Щербаков В.А., Сычев А.Е., Штейнберг А.С. Макрокинетика дегазации в процессе СВС // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 55-61.
16. Отработка рецептуры состава ГСП – 15 для газогенерирующего элемента ЭГ – 8: Отчет по НИР. Отв. исполн. А.Р. Самборук / Куйбышевский политехнический институт им. В.В. Куйбышева (КПИ); Руководитель В.К. Григорьев. 86-25-85, № ГР 01850008558. Куйбышев, 1985. 76 с.

Поступила 16.01.2006 г.