

УДК 532.546

Движение газа через пористые объекты с неравномерным локальным распределением источников тепловыделения*

В.А. Левин, Н.А. Луценко

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток*

E-mail: NickL@inbox.ru

Исследуется движение газа в поле силы тяжести через пористые объекты с неравномерным распределением источников тепла, которые могут возникать в результате природных или техногенных катастроф (как аварийный энергоблок Чернобыльской АЭС). С помощью вычислительного эксперимента проанализировано влияние различных параметров тепловыделяющей зоны на процесс охлаждения таких объектов. Показано, что на разогрев пористого элемента оказывают влияние не только высота тепловыделяющей зоны и интенсивность тепловыделения в ней, но и расстояние от тепловыделяющей зоны до входа в элемент, а также ширина очага выделения тепла. Обнаружен феномен уменьшения разогрева пористого элемента при удалении тепловыделяющей зоны от входа в пористый элемент. Выявлена неоднозначная зависимость разогрева пористого объекта от ширины очага тепловыделения: при росте ширины тепловыделяющей зоны разогрев элемента может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от удаленности очага выделения тепла от входа в элемент.

Ключевые слова: пористая среда, тепловыделение, газовое охлаждение, численное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Многие природные или техногенные катастрофы приводят к возникновению очагов энерговыделения. Такие источники тепла часто появляются в пористых средах, к которым можно отнести завалы разрушенных зданий, грунты, горные породы и т. д. Учитывая высокую потенциальную опасность подобных объектов, необходимо уметь ликвидировать такие очаги тепловыделения. Пример аварийного энергоблока Чернобыльской АЭС показал, что единственно приемлемым средством противодействия катастрофе может оказаться газовое (воздушное) охлаждение таких источников тепла [1].

Активные исследования газового охлаждения очагов тепловыделения в пористых средах начались после катастрофы на ЧАЭС, которая продемонстрировала недостаточную изученность процесса движения газа через пористые объекты

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант № МК-3651.2008.1), РФФИ (грант № 08-01-90003-Бел_а), Фонда содействия отечественной науке, Дальневосточного отделения РАН (проект № 06-III-B-03-079 ДВО РАН).

с выделением тепла. Стационарный режим воздушного охлаждения пористых тепловыделяющих элементов при естественной конвекции исследован в [1]. Несмотря на то, что применяемые в [1] уравнения являются классическими и использованы в той или иной модификации во многих работах по теории фильтрации, новый тип краевой задачи для них, возникший при анализе конкретных условий охлаждения аварийного энергоблока ЧАЭС, привел к открытию новых физических эффектов. В частности, было показано, что стационарный режим охлаждения подобных объектов существует только при выполнении определенного критерия. Стационарные режимы охлаждения пористых тепловыделяющих элементов принудительно нагнетаемым потоком газа рассмотрены в работах [2, 3], где показано, что критерий существования стационарного решения в этом случае зависит также от перепада давления газа на входе и выходе из элемента. В работах [4, 5] предложен численный метод для моделирования нестационарных одномерных течений газа через пористые элементы с выделением тепла, с помощью которого решен ряд задач. В работах [5, 6] показано, что при моделировании движения газа через пористую тепловыделяющую среду необходимо учитывать температурную зависимость его вязкости, поскольку это изменяет решение не только количественно, но и качественно. В работе [5] обнаружено явление неограниченного разогрева пористого тепловыделяющего элемента при докритических краевых условиях, приводящее к перегреву и разрушению такого объекта при условиях, удовлетворяющих критерию стационарности. В работе [7] предложен численный метод для моделирования двумерных нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие элементы, показано влияние формы пористого объекта на процесс его охлаждения.

В настоящей работе исследуется движение газа через пористые элементы с неравномерным распределением источников тепла. С помощью оригинального численного метода [7] решается плоская (двумерная) нестационарная задача о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой фазе для элементов с различными параметрами тепловыделяющей зоны и анализируется их влияние на процесс охлаждения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пористый тепловыделяющий элемент высотой H и шириной L предполагается однородным и неподвижным, по сторонам ограниченным нетеплопроводными стенками, а сверху и снизу открытым (рис. 1). В его нижнюю часть под давлением подается холодный газ, который движется снизу вверх через пористую среду, нагреваясь в результате теплообмена, и вытекает в свободное пространство с заданным давлением.

Модель строится в рамках модели двух взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [8]. Для описания динамики газа используется уравнение сохранения импульса для пористых сред, которое является более корректным, чем классическое уравнение Дарси, и может применяться при достаточно больших числах Рейнольдса. Будем считать, что процесс тепловыделения в твердой фазе происходит в результате протекания химической реакции, тепловыделение прямо пропорционально концентрации

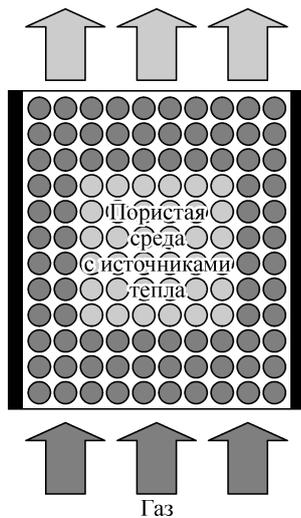


Рис. 1. Пористый тепловыделяющий элемент.

реагирующего вещества C , скорость убывания которой прямо пропорциональна самой концентрации, объем и масса конденсированной фазы изменяются незначительно и этими изменениями можно пренебречь. Предположим, что интенсивность межфазового теплообмена пропорциональна разности фазовых температур в рассматриваемой точке среды, для газа справедливо уравнение состояния совершенного газа. Учитывая в уравнениях энергии фаз теплопроводность и работу внутренних сил в газе, запишем в декартовых координатах систему уравнений, моделирующую нестационарное течение газа через пористый тепловыделяющий элемент:

$$(1-a)\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha(T-T_g) + Q_0(1-a)C + (1-a)\lambda \sum_i \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2},$$

$$a\rho c_p \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + v_{gi} \frac{\partial T_g}{\partial x_i} \right) = \alpha(T-T_g) + a \left(\frac{\partial p}{\partial t} + v_{gi} \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + a^2 \frac{\mu}{k_1} \sum_i v_{gi}^2 + a \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x_i} \right),$$

$$\rho(1+\chi(1-a)) \left(\frac{\partial v_{gi}}{\partial t} + v_{gj} \frac{\partial v_{gi}}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g_i - a \frac{\mu}{k_1} v_{gi}, \quad \frac{\partial a\rho}{\partial t} + \frac{\partial a\rho v_{gi}}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$p = \rho R T_g, \quad \frac{\partial C}{\partial t} = -k_2 C.$$

Здесь и далее a — пористость, c_c — теплоемкость конденсированной фазы, c_p — теплоемкость газа при постоянном давлении, g — ускорение силы тяжести, k_1 — коэффициент проницаемости конденсированной фазы, k_2 — коэффициент, определяющий уменьшение тепловыделения, p — давление газа, Q_0 — константа, определяющая интенсивность тепловыделения, R — газовая постоянная, t — время, T — температура конденсированной фазы, T_g — температура газа, x — Эйлера координата, v_g — скорость газа, α — константа, определяющая интенсивность межфазового теплообмена, λ — теплопроводность конденсированной фазы, λ_g — теплопроводность газа, μ — динамическая вязкость газа, ρ — плотность газа, ρ_c — плотность конденсированной фазы, χ — коэффициент присоединенной массы, учитывающий инерционное взаимодействие фаз при их ускоренном относительном движении. Индексы i, j — номера декартовых координат (для двумерного случая: 1 — горизонтальная, 2 — вертикальная), по повторяющимся индексам происходит суммирование.

При исследовании неизоэтермической фильтрации жидкости динамическая вязкость, как правило, полагается зависящей от температуры [9], однако при моделировании неизоэтермической фильтрации газа вязкость часто принимается постоянной. В работах [5, 6] показано, что при моделировании движения газа через пористую тепловыделяющую среду необходимо учитывать температурную зависимость вязкости газа, поскольку это изменяет решение не только количественно, но и качественно. Далее будем считать, что динамическая вязкость газа зависит от температуры по формуле Сазерленда, а теплопроводность газа пропорциональна его вязкости:

$$\mu = c_{s1} \frac{T_g^{1.5}}{c_{s2} + T_g}, \quad \lambda_g = \frac{c_p}{Pr} \mu, \quad \text{где } Pr \text{ — число Прандтля для газа.}$$

Введем обозначение: $u = av_g$ — скорость фильтрации газа. Из последнего уравнения системы (1) найдем выражение для концентрации реагирующего вещества: $C = \exp(-k_2t)$. Далее введем безразмерные переменные следующим образом: $x = H \tilde{x}$, $t = t_* \tilde{t}$, $u = u_* \tilde{u}$, где t_* и u_* — характерные значения времени и скорости фильтрации газа; $\tilde{p} = p/p_*$, $\tilde{\rho} = \rho/\rho_*$, $\tilde{T} = T/T_*$, $\tilde{T}_g = T_g/T_*$, где p_* , ρ_* , T_* — давление, плотность, температура газа при нормальных условиях. Будем использовать следующие параметры подобия:

$$\begin{aligned} \text{Sh} &= \frac{u_* t_*}{H}, \quad \text{St}_1 = \frac{\alpha H}{\rho_c c_c u_*}, \quad \text{St}_2 = \frac{\alpha H}{\rho_* c_p u_*}, \quad \text{Eu} = \frac{p_*}{\rho_* u_*^2}, \quad \text{Ec} = \frac{u_*^2}{c_p T_*}, \\ \text{Re} &= \frac{\rho_* u_* H}{c_{s1} \sqrt{T_*}}, \quad \text{Pe}_1 = \frac{u_* \rho_c c_c H}{\lambda}, \quad \text{Pe}_2 = \frac{u_* \rho_* H}{c_{s1} \sqrt{T_*}} \text{Pr}, \quad \text{Fr} = \frac{u_*^2}{gH}, \\ \pi &= \frac{k_1}{H^2}, \quad \tilde{Q} = \frac{Q_0 t_*}{\rho_c c_c T_*}, \quad \varepsilon = k_2 t_*, \quad \tilde{c}_{s2} = \frac{c_{s2}}{T_*}. \end{aligned}$$

Заметим, что поскольку теплопроводность газа мала, то $\text{Pe}_2 \gg 1$, и следовательно, его содержащим, можно пренебречь. Для случая, когда все параметры состояния модели зависят от двух декартовых координат, перепишем систему (1) в безразмерных переменных, опустив тильду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} &= -\frac{\text{Sh St}_1}{1-a} (T - T_g) + Q \exp(-\varepsilon t) + \frac{\text{Sh}}{\text{Pe}_1} \sum_i \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}, \\ \rho \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{\text{Sh}}{a} u_i \frac{\partial T_g}{\partial x_i} \right) &= \frac{\text{Sh St}_2}{a} (T - T_g) + \text{Eu Ec} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\text{Sh}}{a} u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + \frac{\text{Sh Ec}}{a \text{Re } \pi} \sum_i u_i^2 \frac{T_g^{1.5}}{\tilde{c}_{s2} + T_g}, \\ \frac{1 + \chi(1-a)}{a} \rho \left(\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\text{Sh}}{a} u_i \frac{\partial u_1}{\partial x_i} \right) &= -\text{Eu Sh} \frac{\partial p}{\partial x_1} - \frac{\text{Sh}}{\text{Re } \pi} u_1 \frac{T_g^{1.5}}{\tilde{c}_{s2} + T_g}, \quad (2) \\ \frac{1 + \chi(1-a)}{a} \rho \left(\frac{\partial u_2}{\partial t} + \frac{\text{Sh}}{a} u_i \frac{\partial u_2}{\partial x_i} \right) &= -\text{Eu Sh} \frac{\partial p}{\partial x_2} - \frac{\text{Sh}}{\text{Fr}} \rho - \frac{\text{Sh}}{\text{Re } \pi} u_2 \frac{T_g^{1.5}}{\tilde{c}_{s2} + T_g}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\text{Sh}}{a} \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} &= 0, \quad p = \rho T_g. \end{aligned}$$

На входе в пористый элемент известны температура газа и давление. На выходе известно давление, т. к. истечение газа происходит в открытое пространство. Известны также условия теплообмена на входе и выходе из пористого элемента и на ограничивающих его непроницаемых стенках. Отличительной особенностью модели является то, что расход и скорость фильтрации газа на входе в пористый элемент неизвестны и должны определяться при решении задачи. Таким образом, краевые условия для системы (2) имеют следующий вид:

$$p|_{x_2=0} = p_0(t), \quad T_g|_{x_2=0} = T_{g0}(t), \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x_2} \right|_{x_2=0} = \text{Bi}(T|_{x_2=0} - T_{g0}), \quad u_1|_{x_2=0} = 0,$$

$$p|_{x_2=1} = p_h, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x_2} \right|_{x_2=1} = Bi(T_g|_{x_2=1} - T|_{x_2=1}), \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{x \in G} = 0, \quad \left. \frac{\partial T_g}{\partial n} \right|_{x \in G} = 0, \quad u_n|_{x \in G} = 0.$$

Здесь G — поверхность боковых стенок, n — вектор, направленный по нормали к этой поверхности, $Bi = \beta H / \lambda$, где β — коэффициент теплоотдачи.

Для решения системы (2) необходимо также задать значения искомых величин в начальный момент времени.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРИСТОГО ЭЛЕМЕНТА С НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

Система уравнений (2), моделирующая плоское нестационарное движение газа через пористый тепловыделяющий элемент, является нелинейной смешанной гиперболически-параболической системой уравнений и в общем случае не может быть решена аналитически. Граничные условия в задачах данного класса существенно отличаются от условий в классических задачах механики многокомпонентных сред, что затрудняет применение здесь широко известных конечно-разностных схем. Поэтому для исследования плоских (двумерных) нестационарных режимов охлаждения пористого элемента с выделением тепла был разработан оригинальный численный метод [7], основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем.

Исследование влияния неравномерности тепловыделения в пористом объекте на процесс охлаждения, которому посвящена настоящая работа, проводится следующим образом. Решается плоская (двумерная) нестационарная задача о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой фазе для элементов с различными параметрами тепловыделяющей зоны. В настоящей работе ограничимся рассмотрением элементов с одинаковыми высотой и шириной, то есть при $H = L$, очаг тепловыделения в которых имеет прямоугольную форму и симметричен относительно вертикальной оси, проходящей через центр пористого элемента. При исследовании будем менять высоту тепловыделяющей зоны H_1 , ее ширину L_1 , а также расстояние от нее до входа в тепловыделяющий элемент H_2 . Начально-краевые условия и параметры задачи выбираются таким образом, чтобы процесс охлаждения со временем перешел в устойчивое стационарное состояние (точнее — в квазистационарное, т. к. интенсивность тепловыделения со временем медленно убывает из-за “выгорания” реагирующего вещества, что приводит к медленному изменению всех остальных параметров). Далее сравниваются температуры твердой среды в максимально горячей зоне и в середине выхода из элемента, то есть сравнение проводится по разогреву элемента.

Рассмотрим задачу о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой среде. Тепловыделение в твердой фазе до начального момента времени отсутствует, давление на входе в элемент и на выходе из него соответствует атмосферному давлению на заданных высотах, следовательно, движение воздуха в элементе отсутствует. В начальный момент времени начинается тепловыделение в твердой фазе и одновременно происходит быстрый рост давления газа на входе в элемент. Далее, если не оговорено особо, будем рассматривать систему (2) со следующими безразмерными параметрами:

$$\begin{aligned} \text{Sh} = 0,1, \quad \text{St}_1 = 4,94 \cdot 10^{-3}, \quad \text{St}_2 = 8,33, \quad \text{Eu} = 8,33 \cdot 10^4, \quad \text{Ec} = 3,33 \cdot 10^{-6}, \\ \text{Re} = 4,75 \cdot 10^5, \quad \text{Pe}_1 = 1,687 \cdot 10^7, \quad \text{Fr} = 1,02 \cdot 10^{-2}, \quad \text{Bi} = 83,33, \quad \pi = 10^{-10}, \quad (4) \\ Q = 1,647 \cdot 10^{-4}, \quad \varepsilon = 10^{-7}, \quad \hat{c}_{s2} = 0,368, \quad a = 0,3, \quad \chi = 0,5. \end{aligned}$$

Эти данные соответствуют следующим размерным величинам:

$$\begin{aligned} H = 10 \text{ м}, \quad t_* = 1 \text{ с}, \quad u_* = 1 \text{ м/с}, \quad T_* = 300 \text{ К}, \quad p_* = 10^5 \text{ Па}, \quad \rho_* = 1,2 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_c = 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \quad c_c = 9,2 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \alpha = 10^3 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \\ c_p = 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad c_{s1} = 1,458 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \sqrt{\text{К}}), \quad c_{s2} = 110,4 \text{ К}, \\ k_1 = 10^{-8} \text{ м}^2, \quad Q_0 = 10^5 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{с)}, \quad \lambda = 1,2 \text{ Дж/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \\ g = 9,8 \text{ м/с}^2, \quad k_2 = 10^{-7} \text{ 1/с}, \quad \beta = 10 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с)}. \end{aligned}$$

Пусть давление на входе в элемент быстро возрастет до 1,5 и после достижения этого значения остается постоянным. Тогда краевые условия получаются из (3) при следующих значениях:

$$p_0 = 1,5, \quad T_{g0} = 1, \quad p_h = 1. \quad (5)$$

На рис. 2 представлен пример распределения температуры твердой среды, температуры газа, давления, плотности газа, вертикальной и горизонтальной скоростей

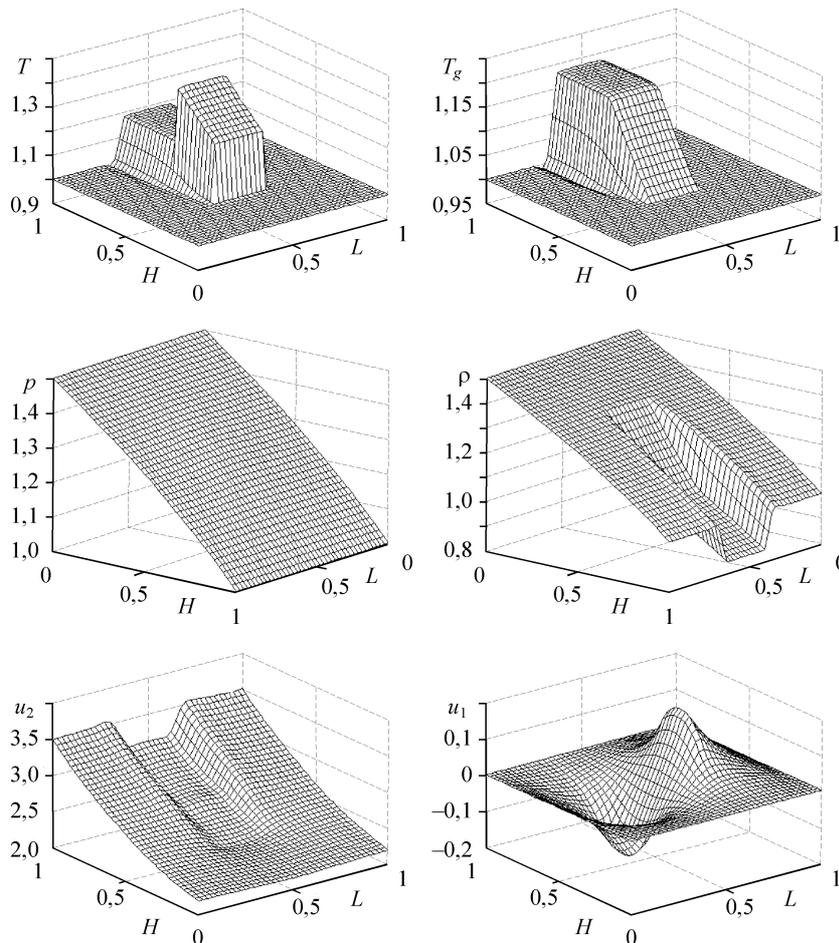


Рис. 2. Распределение температуры твердой среды T , температуры газа T_g , давления P и плотности ρ газа, вертикальной u_2 и горизонтальной u_1 скоростей фильтрации газа по элементу.

фильтрации газа по элементу при ширине и высоте тепловыделяющей зоны $L_1 = H_1 = 0,25$ в случае, когда тепловыделяющая зона расположена в центре пористого элемента, через $t = 32400$ (что соответствует 9 часам размерного времени) после начала процесса. К этому времени квазистационарный режим охлаждения уже установился. Все приведенные в дальнейшем в настоящей работе графики параметров соответствуют такому же моменту времени. Для лучшей визуализации графики давления и плотности газа развернуты на 180° . Как видно на рисунке, температура как твердой фазы, так и газообразной существенно изменяется только в зоне тепловыделения и выше нее, а ниже — остается неизменной. Максимально нагреваясь в самой верхней части очага тепловыделения, твердая фаза затем резко снижает свою температуру, которая после этого мало изменяется до выхода из элемента. Газ, проходя зону тепловыделения, нагревается и остается при почти постоянной температуре, которая становится близкой к температуре твердой среды. Давление газа равномерно уменьшается с высотой, очаг выделения тепла не вносит заметных локальных изменений в график давления. Плотность газа уменьшается с высотой по всему элементу, при этом в зоне тепловыделения происходит ее более сильное изменение. Вертикальная компонента скорости фильтрации газа равномерно растет с высотой по краям элемента. В центральной части элемента, встречая на своем пути очаг выделения тепла, часть потока газа стремится его обогнуть — из-за этого возникает горизонтальное движение газа, а вертикальная компонента скорости фильтрации в зоне тепловыделения и выше нее оказывается меньше, чем по краям элемента на аналогичной высоте. Такой вид распределения по элементу искомых величин характерен для течения газа через пористый элемент с произвольной прямоугольной зоной тепловыделения.

Ниже приведены некоторые решения рассмотренной выше задачи о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой среде, полученные при использовании системы уравнений (2) с параметрами подобия (4) и краевыми условиями (3) при значениях (5).

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЗОНЫ НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРИСТОГО ЭЛЕМЕНТА

На рис. 3 показана температура твердой среды в максимально горячей зоне ($\max T$, 1, 2) и в середине выхода из элемента ($T|_{y=1}$, 3, 4) для разной высоты тепловыделяющей зоны, расположенной в центре пористого элемента, при ширине тепловыделяющей зоны $L_1 = 0,25$ и 1. Как видно на рисунке, при увеличении высоты очага выделения тепла температура твердой среды нелинейно растет. Это объясняется тем, что при увеличении протяженности по вертикали зоны тепловыделения газ, проходящий через нее, нагревается сильнее и меньше охлаждает твердую среду. Разогрев пористого элемента при постоянном перепаде давления ведет

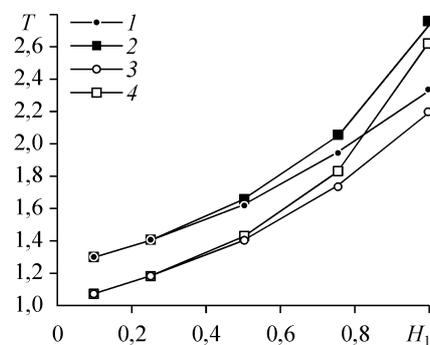


Рис. 3. Температура твердой среды в точках максимума ($\max T$, 1, 2) и на выходе из элемента ($T|_{y=1}$, 3, 4) для разной высоты тепловыделяющей зоны и ширины $L_1 = 0,25$ (1, 3), 1 (2, 4).

к уменьшению скорости фильтрации и, соответственно, расхода газа, проходящего через очаг тепловыделения. Уменьшение газового потока, охлаждающего элемент, приводит к тому, что рост температуры при увеличении высоты очага выделения тепла оказывается нелинейным. На рисунке можно заметить, что увеличение ширины зоны тепловыделения в 4 раза не приводит к значительному изменению разогрева элемента, а при высотах тепловыделяющей зоны менее 0,5 это изменение практически незаметно — более узкий очаг тепловыделения разогревается почти так же, как гораздо более широкий. Отсюда следует, что охлаждение узких сильно вытянутых по вертикали тепловыделяющих зон происходит неэффективно, т. к. большая часть газа, нагнетаемого в пористый элемент, не участвует в теплообмене с тепловыделяющей твердой фазой.

ВЛИЯНИЕ УДАЛЕННОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЗОНЫ ОТ ВХОДА В ЭЛЕМЕНТ НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРИСТОГО ЭЛЕМЕНТА

На рис. 4, *a* показана температура твердой среды в максимально горячей зоне ($\max T$, 1, 2) и в середине выхода из элемента ($T|_{y=1}$, 3, 4) для разного расстояния от тепловыделяющей зоны до входа в элемент при ширине тепловыделяющей зоны $L_1 = 0,1$ и 1, высоте тепловыделяющей зоны $H_1 = 0,1$. Как видно на рисунке, при удалении очага выделения тепла от входа в пористый элемент температура твердой среды незначительно уменьшается. Если же увеличить интенсивность тепловыделения, положив $Q_0 = 5 \cdot 10^5$ Дж/(м³·с), то уменьшение разогрева пористого элемента при увеличении расстояния от тепловыделяющей зоны до входа в элемент становится намного более существенным, что наглядно демонстрирует рис. 4, *b*. Это можно объяснить тем, что модуль градиента давления с высотой увеличивается, а это ведет к улучшению прокачки газа через тепловыделяющую зону. Как следствие, выше оказывается расход газа и, соответственно, суммарный отвод тепла из пористого элемента. Также на рисунке можно заметить, что влияние удаления очага выделения тепла от входа в пористый элемент на процесс охлаждения увеличивается с шириной этого очага.

Таким образом эффективнее происходит охлаждение пористых элементов с очагами выделения тепла, расположенными ближе к выходу из элемента.

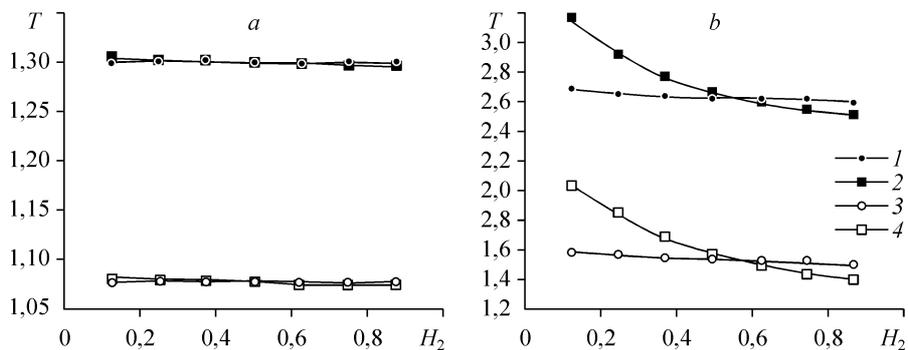


Рис. 4. Температура твердой среды в точках максимума ($\max T$, 1, 2) и на выходе из элемента ($T|_{y=1}$, 3, 4) для разной удаленности тепловыделяющей зоны от входа в элемент: *a* — $Q_0 = 10^5$ Дж/(м³·с), *b* — $Q_0 = 5 \cdot 10^5$ Дж/(м³·с); $L_1 = 0,1$ (1, 3), 1 (2, 4).

**ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЗОНЫ
НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРИСТОГО ЭЛЕМЕНТА**

На рис. 5, *a* показана температура твердой среды в максимально горячей зоне ($\max T, 1, 2$) и в середине выхода из элемента ($T|_{y=1}, 3, 4$) для разной ширины тепловыделяющей зоны, расположенной в центре пористого элемента, при высоте тепловыделяющей зоны $H_1 = 0,25$ и 1 . Как видно на рисунке, разогрев пористого элемента при росте ширины очага тепловыделения может как увеличиваться, так и оставаться неизменным в зависимости от высоты тепловыделяющей зоны. Для не очень протяженных по вертикали очагов тепловыделения рост их ширины не приводит к заметному изменению температуры. Это обусловлено тем, что при росте ширины тепловыделяющей зоны также увеличивается количество газа, проходящего через нее. Рост разогрева с увеличением ширины очага тепловыделения, наблюдаемый у протяженных по вертикали очагов, связан, очевидно, со значительным возрастанием суммарного тепловыделения в этом случае, что приводит к падению расхода газа, охлаждающего пористый элемент. Таким образом, охлаждение узких сильно вытянутых по горизонтали тепловыделяющих зон происходит эффективно, т. к. большая часть газа, нагнетаемого в пористый элемент, участвует в теплообмене с тепловыделяющей твердой фазой.

Теперь будем варьировать ширину очага выделения тепла при его разной удаленности от входа в пористый элемент. На рис. 5, *b* показана температура твердой среды в максимально горячей зоне ($\max T, 1, 2$) и в середине выхода из элемента ($T|_{y=1}, 3, 4$) для разной ширины тепловыделяющей зоны при ее высоте $H_1 = 0,25$ и расстоянии от нее до входа в элемент $H_2 = 0,25$ и $0,75$. Как видно на рисунке, рост ширины очага тепловыделения при его расположении ближе к входу в элемент ведет к повышению температуры. При расположении зоны тепловыделения ближе к выходу из элемента мы наблюдаем прямо противоположную картину — при увеличении ширины этой зоны температура падает. Этот интересный феномен объясняется просто. Когда очаг тепловыделения расположен ближе к выходу из элемента, то градиент давления здесь выше и охлаждение из-за этого лучше. Но в то же время из-за высокого градиента давления при уменьшении ширины тепловыделяющей зоны части газового потока, проходящего через нее, становится “выгоднее” ее обогнуть. В результате этого расход газа через очаг тепловыделения падает при уменьшении его ширины, и, следовательно, увеличивается его разогрев. Таким образом, охлаждение узких сильно вытянутых по горизонтали

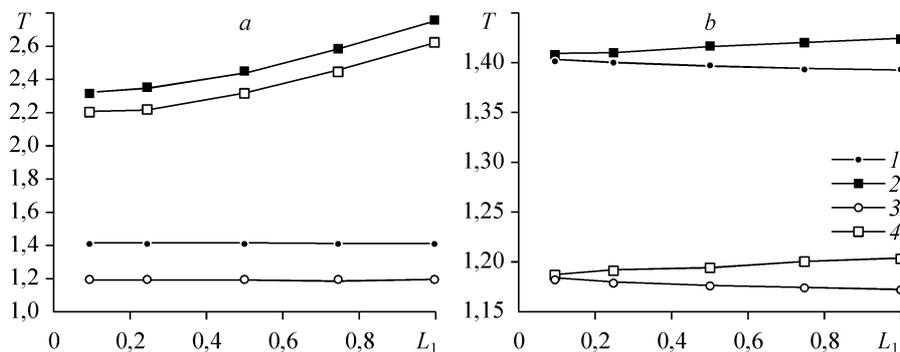


Рис. 5. Температура твердой среды в точках максимума ($\max T, 1, 2$) и на выходе из элемента ($T|_{y=1}, 3, 4$) для разных: *a* — ширины тепловыделяющей зоны и высоты $H_1 = 0,25$ (1, 3), 1 (2, 4); *b* — ширины тепловыделяющей зоны при разной ее удаленности H_2 от входа в элемент, $H_1 = 0,25$ (1–4), $H_2 = 0,75$ (1, 3), 0,25 (2, 4).

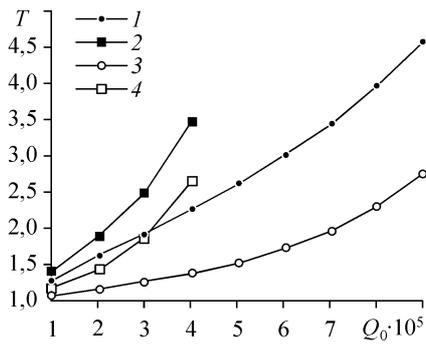


Рис. 6. Температура твердой среды в точках максимума ($\max T, 1, 2$) и на выходе из элемента ($T|_{y=1}, 3, 4$) для разной интенсивности тепловыделения, $L_1 = H_1 = 0,1$ (1, 3), 0,25 (2, 4).

тепловыделяющих зон осуществляется более эффективно при близости этих зон к выходу из пористого элемента.

Можно сделать вывод, что изменение ширины тепловыделяющей зоны влияет на разогрев пористого объекта незначительно, но неоднозначно. Охлаждение

узких сильно вытянутых по горизонтали тепловыделяющих зон происходит эффективно, причем чем ближе к выходу из пористого элемента такая зона, тем эффективнее охлаждение.

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРИСТОГО ЭЛЕМЕНТА

Решения, полученные при варьировании параметра Q_0 приведены на рис. 6, на котором показана температура твердой среды в максимально горячей зоне ($\max T, 1, 2$) и в середине выхода из элемента ($T|_{y=1}, 3, 4$) для разной интенсивности тепловыделения очага, расположенного в центре пористого элемента, при ширине и высоте этого очага $L_1 = H_1 = 0,1$ и 0,25. Как видно на рисунке, при увеличении интенсивности тепловыделения очага температуры нелинейно растут. Это объясняется тем, что повышение разогрева при постоянном перепаде давления ведет к уменьшению скорости фильтрации и, соответственно, расхода газа. Очевидно, что при постоянном газовом потоке, охлаждающем элемент, увеличение интенсивности тепловыделения приводило бы к прямо пропорциональному росту температур газа и твердой фазы в квазистационарном режиме охлаждения. Но поскольку при постоянном перепаде давления поток охлаждающего газа уменьшается при повышении разогрева элемента, то увеличение интенсивности тепловыделения приводит к нелинейному росту температур. Таким образом, при увеличении интенсивности тепловыделения очага разогрев твердой среды нелинейно возрастает со скоростью, увеличивающейся при росте тепловыделения.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА ВХОДЕ В ЭЛЕМЕНТ НА ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ

На рис. 7 показана температура твердой среды в максимально горячей зоне ($\max T, 1, 2$) и в середине выхода из элемента ($T|_{y=1}, 3, 4$) для разного давления газа на входе в элемент при ширине и высоте тепловыделяющих зон $L_1 = H_1 = 0,1$ и 0,25, расположенных в центре пористого элемента. Как видно на рисунке, при увеличении перепада давления температуры нелинейно уменьшаются, причем с ростом давления падение температур

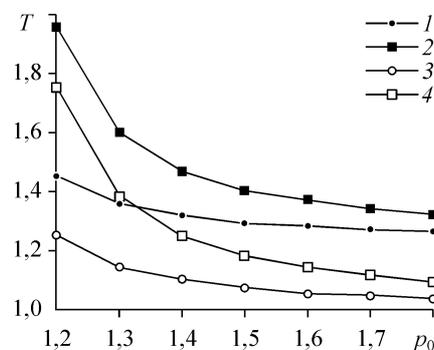


Рис. 7. Температура твердой среды в точках максимума ($\max T, 1, 2$) и на выходе из элемента ($T|_{y=1}, 3, 4$) для разного давления газа на входе в элемент, $L_1 = H_1 = 0,1$ (1, 3), 0,25 (2, 4).

замедляется. На выходе из элемента температура асимптотически стремится к температуре окружающей среды. Таким образом, чем выше давление газа на входе в пористый элемент, тем меньше понижает разогрев очага дальнейшее повышение давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью вычислительного эксперимента проведено исследование влияния на процесс охлаждения неравномерности распределения источников тепла в пористом объекте, для чего решена плоская (двумерная) нестационарная задача о включении принудительной фильтрации в момент начала тепловыделения в твердой фазе для пористых элементов с различными параметрами тепловыделяющей зоны. Показано, что при увеличении высоты очага выделения тепла разогрев твердой среды нелинейно растет, охлаждение узких сильно вытянутых по вертикали тепловыделяющих зон осуществляется неэффективно. Также показано, что при удалении очага выделения тепла от входа в пористый объект разогрев твердой среды уменьшается, поэтому эффективнее происходит охлаждение пористых элементов с зонами тепловыделения, расположенными ближе к выходу из элемента. Выявлено, что изменение ширины тепловыделяющей зоны неоднозначно влияет на разогрев пористого объекта: при росте ширины тепловыделяющей зоны разогрев элемента может как увеличиваться, так и уменьшаться. Влияние ширины тепловыделяющей зоны на разогрев достаточно мало, поэтому охлаждение узких сильно вытянутых по горизонтали тепловыделяющих зон происходит эффективно, причем чем ближе к выходу из пористого элемента такая зона, тем эффективнее охлаждение. Показано, что при увеличении интенсивности тепловыделения очага разогрев твердой среды нелинейно возрастает со скоростью, увеличивающейся при росте тепловыделения. Также показано, что чем выше давление газа на входе в пористый элемент, тем меньше понижает разогрев очага дальнейшее повышение давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маслов В.П., Мясников В.П., Данилов В.Г. Математическое моделирование аварийного блока Чернобыльской АЭС. — М.: Наука, 1987. — 144 с.
2. Левин В.А., Луценко Н.А. Стационарный режим фильтрационного охлаждения пористого тепловыделяющего элемента // Юбилейный сборник: К тридцатилетию Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН. — Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2001. — С. 151–159.
3. Луценко Н.А. Одномерный стационарный режим фильтрации газа через слой неподвижного тепловыделяющего конденсированного материала // Дальневосточный математический журнал. — 2002. — Т. 3, № 1. — С. 123–130.
4. Луценко Н.А. Нестационарные режимы охлаждения пористого тепловыделяющего элемента // Математическое моделирование. — 2005. — Т. 17, № 3. — С. 120–128.
5. Левин В.А., Луценко Н.А. Возникновение неустойчивых режимов охлаждения пористого тепловыделяющего элемента при докритических краевых условиях // Горение и плазмохимия. — 2005. — Т. 3, № 2. — С. 81–90.
6. Левин В.А., Луценко Н.А. Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа // Инженерно-физический журнал. — 2006. — Т. 79, № 1. — С. 35–40.
7. Левин В.А., Луценко Н.А. Численное моделирование двумерных нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие элементы // Вычислительные технологии. — 2006. — Т. 11, № 6. — С. 44–58.
8. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. — М.: Наука, 1978. — 336 с.
9. Жумагулов Б.Т., Монахов В.Н. Гидродинамика нефтедобычи. — Алматы: КазгосИНТИ, 2001. — 336 с.

Статья поступила в редакцию 4 марта 2008 г.