

УДК 620.92.002.68;621.1.016;544.47

О. С. РАБИНОВИЧ, А. И. МАЛИНОВСКИЙ

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОГО ФРОНТА ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

(Представлено членом-корреспондентом О. Г. Пенязьковым)

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск

Поступило 06.10.2014

Введение. Фильтрационное горение твердых (конденсированных) топлив (ФГТТ) является основой многих перспективных технологий. К таким технологиям относятся сжигание, газификация и термохимическая конверсия местных видов топлива (биомассы, сланцев, отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности), добыча сильно связанной с грунтом нефти методом внутрислового горения, регенерация сорбентов, очистка грунтов от органических загрязнений и др.

Практическая реализация фильтрационного сжигания твердых топлив в спутной волне горения¹ с инверсной структурой² сталкивается с проблемой неустойчивости [1–3]: плоский фронт, располагавшийся первоначально перпендикулярно направлению фильтрации газа, перестраивается в наклонный либо распадается на отдельные очаги и впоследствии погасает. Развитие неустойчивости приводит к неполному сгоранию твердого топлива, образованию в реакторе перегретых зон, неэффективному использованию продуваемого газового потока.

Аналогичное неустойчивое поведение демонстрируют и спутные волны фильтрационного горения газов [4–6], имеющие такую же тепловую структуру. Неустойчивость рассматриваемого типа получила название тепло-гидродинамической, поскольку основной механизм роста возмущений плоского фронта горения связан с обратной зависимостью фильтрационной проницаемости слоя от температуры. При пространственном возмущении плоского фронта горения происходит перестройка поля фильтрации в окрестности этого возмущения так, что в области пониженной температуры поток газообразного реагента возрастает, а в области повышенной температуры – убывает. В результате участки фронта с большим локальным расходом распространяются быстрее, и возмущение растет. Факторами, препятствующими росту возмущения и сглаживающими температурную неоднородность, являются теплопроводность и увеличение тепловыделения на участках фронта с повышенным расходом газообразного реагента. В случае горения твердого топлива возможность его неполного сгорания значительно усложняет характер развития указанной неустойчивости.

В основе рассмотренной в работе тепло-гидродинамической неустойчивости ФГТТ лежит единая для всех фильтрационных процессов зависимость проницаемости пористой среды от температуры. В настоящей работе не рассматриваются другие, более специфические, особенности фильтрационного горения, связанные с изменением структуры пористого слоя. Также

¹ Спутная волна горения распространяется в направлении продувки (фильтрации) газа.

² Инверсная структура спутной волны горения – структура, в которой исходное твердое топливо прогрето до температуры горения, а сгоревшая часть пористого слоя охлаждена входящим газовым потоком до его начальной температуры. В спутной волне с нормальной структурой прогреты продукты сгорания, а исходный пористый материал имеет начальную температуру.

определенные ограничения на общность излагаемых результатов накладывает использованная в работе двумерная постановка проблемы. По-видимому, в трехмерном случае возможны более сложные типы динамического поведения волны горения в результате развития неустойчивости.

Цель исследования – определить критические условия, при которых возникает тепло-гидродинамическая неустойчивость ФГТТ, а также исследовать сценарии развития неустойчивости. Решение поставленной задачи осуществлялось методом численного моделирования в терминах безразмерных переменных, что позволило сформулировать результаты исследования в общем виде.

Постановка задачи о тепло-гидродинамической устойчивости спутных волн ФГТТ. В основе излагаемого ниже анализа устойчивости лежат модели одномерных режимов фильтрационного горения твердого топлива, предложенные в [7–9]. Рассматриваются спутные волны ФГТТ в однотемпературном приближении, т. е. в условиях высокоинтенсивного теплообмена между газовым потоком и пористым каркасом.

Используются следующие упрощающие допущения: объемная теплоемкость пористой среды $c_{p,s}^V$ в результате сгорания твердого топлива не изменяется; при вычислении объемной теплоемкости системы пренебрегается теплоемкостью газа по сравнению с теплоемкостью конденсированной фазы; молярная плотность ρ_g^m и молярная теплоемкость газа $c_{p,g}^m$ не зависят от его состава; фильтрация газа описывается законом Дарси, а проницаемость пористой среды обратно пропорциональна вязкости газа, меняющейся с температурой; эффективная теплопроводность системы λ_{ef} постоянна; химическая реакция между твердым топливом и газообразным окислителем имеет нулевой порядок по обоим реагентам и зависит от температуры по Аррениусу; в результате реакции не происходит изменения молярного расхода газа.

В указанных предположениях система безразмерных уравнений для рассматриваемой задачи имеет вид:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \delta(\Gamma \tilde{\nabla} \Theta) = \tilde{\nabla}^2 \Theta + \frac{1}{\gamma^2} \Omega, \quad (1)$$

$$\tilde{\nabla}(\Gamma \xi) = -\frac{\Omega}{\gamma}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \frac{\Omega}{\gamma}, \quad (3)$$

$$\Omega = \begin{cases} \exp\left(\frac{\Theta}{1 + \beta \Theta}\right) & \text{при } 0 < \eta < 1, \xi > 0; \\ 0 & \text{при } \eta = 1 \text{ или } \xi = 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{\nabla}(\Gamma) = 0; \quad \Gamma = -\chi \tilde{\nabla} \pi, \quad (5)$$

$$\chi(\Theta) = \left(\frac{1 + \beta \Theta_0}{1 + \beta \Theta}\right)^{5/2} \frac{1 + \beta \Theta + \tilde{C}_A}{1 + \beta \Theta_0 + \tilde{C}_A}. \quad (6)$$

В системе уравнений (1)–(6) использованы следующие обозначения безразмерных переменных: $\Theta = (T - T_*) / \Delta T_*$ – температура; $\tau = t / t_*$ – время; η – степень конверсии твердого топлива; ξ – концентрация газообразного реагента; $\Gamma = G / G_*$ – плотность потока газа; $\Omega(\Theta, \eta, \xi)$ – скорость реакции; χ – фильтрационная проницаемость; π – давление; \tilde{C}_A – постоянная Сазерленда; $\tilde{\nabla}$ – безразмерный оператор «набла».

Безразмерные параметры δ, γ, β определяются как

$$\gamma = \frac{\Delta T_* c_{p,s}^V}{Q(\rho_{s,1}^m)^0} = \frac{\Delta T_*}{q}; \quad \beta = \frac{\Delta T_*}{T_*}; \quad \delta = \frac{\nu c_{p,g}^m \zeta^0}{\xi_0 c_{p,s}^m},$$

где Q – тепловой эффект на 1 моль твердого топлива; $(\rho_{s,1}^m)^0$ и ζ^0 – его исходная молярная плотность и относительная молярная доля в пористом слое; ν – стехиометрический коэффициент по газообразному реагенту; $c_{p,g}^m$ и $c_{p,s}^m$ – молярные теплоемкости газа и твердого материала.

Представленные ниже численные расчеты проводились при заданном расходе фильтруемого газа – условии, которое наиболее часто реализуется на практике.

Результаты моделирования тепло-гидродинамической неустойчивости ФГТТ. *Границы тепло-гидродинамической неустойчивости ФГТТ.* Численное моделирование проводилось на основе метода контрольных объемов. При моделировании использовались безразмерные параметры, характерные для сверхадиабатических режимов горения кокса в инертной засыпке (оксид алюминия, шамот): $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,077$, $\delta = 1,5$. При выбранном значении δ перепад температур в одномерной спутной волне ФГТТ с инверсной структурой и полным потреблением газообразного реагента оказывается в два раза больше адиабатического разогрева системы.

В работе рассматривается распространение спутных волн ФГТТ в двумерной прямоугольной области, вытянутой в направлении фильтрации. Основным предметом исследования являлось влияние двух свободных параметров задачи – Γ_0 и H – на устойчивость плоского фронта горения.

Шаг пространственной сетки составлял $0,05$ – $0,10x_*$, интегрирование по времени производилось с шагом $\Delta\tau = 0,005$.

Для всех значений исследованных параметров процесс горения инициировался заданием в начальный момент прогретой поперечной зоны пористого слоя вблизи входной границы газового потока. В зависимости от профиля температуры на передней, по отношению к направлению газового потока, границе прогретой зоны реализовывались различные пространственные типы возмущения плоского фронта горения, приводившие к развитию новых неоднородных структур волны горения. Представленные далее примеры демонстрируют как происходит перестройка плоского фронта горения в зависимости от вида начальных условий и значения параметра H (средний удельный расход газа через слой Γ_0 постоянен).

Численное моделирование спутных волн ФГТТ позволило выявить следующие закономерности для исследованной области безразмерных параметров ($2 < H < 28$; $0,5 < \Gamma_0 < 3,0$, $\delta = 1,5$):

спутные волны ФГТТ с нормальной структурой устойчивы по отношению к указанному способу инициирования горения и возбуждения неустойчивости;

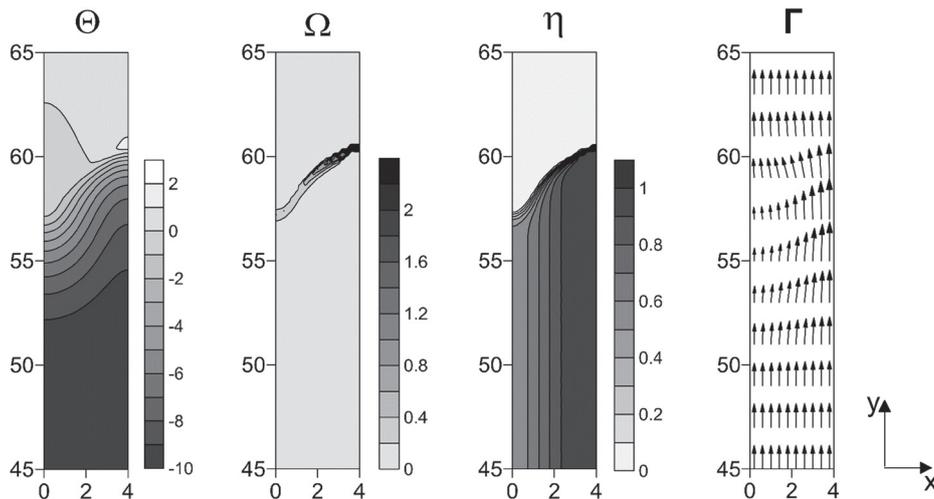


Рис. 1. Структура стационарного наклонного фронта ФГТТ вблизи порога неустойчивости плоской спутной инверсной волны: Θ – поле температуры; Ω – скорость реакции; η – конверсия твердого топлива; Γ – фильтрационные потоки. Расчетные безразмерные параметры: $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,077$, $\delta = 1,5$, $\Gamma_0 = 2,0$, $H = 4,0$

спутные волны ФГТТ с инверсной структурой проявляют неустойчивость в определенной области безразмерных параметров Γ_0 и H (при фиксированных γ , β и δ);

если параметры системы соответствуют области неустойчивости плоского фронта волны горения с инверсной структурой, то пороговое возмущение, приводящее к развитию неустойчивости, чрезвычайно мало: даже в отсутствие искусственного возмущения неустойчивость развивается. Однако при приближении к параметрической границе этой области время развития неустойчивости становится очень большим (по-видимому, стремится к бесконечности).

В области неустойчивости, вблизи ее границы, происходит установление стационарного наклонного фронта спутной инверсной волны горения, структура которой представлена на рис. 1. Характерные поля температуры, скорости реакции, конверсии твердого топлива и потоков фильтрации иллюстрируют природу тепло-гидродинамической неустойчивости. В окрестности наклонного фронта происходит перестройка потоков фильтрации, вызванная снижением фильтрационного сопротивления в области, где фронт горения продвинул дальше по потоку. Это приводит к увеличению скорости подачи газообразного реагента в указанную область, повышению в ней тепловыделения и порождает поперечный градиент температуры. В результате перераспределения потоков фильтрации количество газообразного реагента, поступающего в отстающую часть фронта, уменьшается, и скорость распространения фронта горения в этом месте снижается, так что лидирующая часть фронта еще больше опережает отстающую. Конкурирующим эффектом, стабилизирующим наклонный фронт, является теплопроводность, стремящаяся выровнять поперечные градиенты температуры.

Практический интерес представляет область безразмерных параметров, в которой распространение плоского фронта спутной инверсной волны ФГТТ неустойчиво. Результат параметрического исследования наклонной неустойчивости для рассматриваемого случая изображен на рис. 2. В качестве характеристик отклонения фронта горения от плоского, перпендикулярного боковым стенкам, реактора выбран угол его наклона (рис. 2, а) $\alpha_f = \arctg[(x_{f,r} - x_{f,l})/H]$, где $x_{f,r}$ – x -координата опережающей части фронта; $x_{f,l}$ – x -координата его отстающей части, а также средняя конверсия твердого топлива для установившегося наклонного фронта $\langle \eta \rangle$ (рис. 2, б). На рис. 2 видно, что с увеличением H критическое (минимальное) значение удельного расхода газа Γ_0 , при котором возникает рассматриваемая неустойчивость, падает.

Важной особенностью неустойчивости плоского фронта фильтрационного горения твердого топлива, отличающей этот тип горения от фильтрационного горения газов, является значительное снижение полноты сгорания твердого топлива. Это отрицательное с технологической точки зрения явление требует особого внимания при проектировании реакторов для сжигания и газификации твердых топлив.

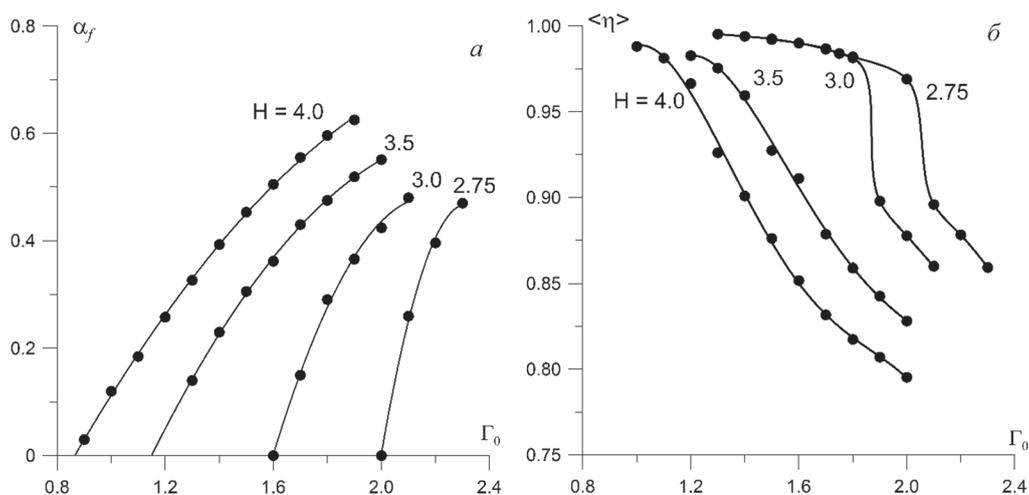


Рис. 2. Зависимости угла наклона фронта α_f (а) и средней конверсии твердого топлива $\langle \eta \rangle$ (б) от безразмерного удельного расхода газа Γ_0 для различной безразмерной ширины слоя. Расчетные безразмерные параметры: $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,077$, $\delta = 1,5$

Сценарии развития двумерной неустойчивости спутных инверсных волн ФГТТ. Численное моделирование показало, что эволюция неустойчивого плоского фронта горения зависит от двух факторов: от степени удаленности параметров процесса от границы устойчивости и от характера возмущения, инициирующего перестройку фронта горения. Ниже этот вывод иллюстрируется примерами, в которых рассматриваются различия в развитии неустойчивости при фиксированном удельном расходе газа Γ_0 и возрастающих значениях ширины пористого слоя H .

Как было показано выше, при переходе H в область неустойчивости происходит установление стационарного наклонного фронта горения (рис. 1). Для безразмерного удельного расхода $\Gamma_0 = 2,0$ критическая ширина слоя $H \approx 3,5$. Эту величину можно рассматривать как минимальную ширину наклонного фронта при данных параметрах. Вблизи границы области неустойчивости результат перестройки плоского фронта горения не зависит от вида начального возмущения. По мере дальнейшего увеличения ширины пористого слоя наклон установившегося после перестройки фронта горения увеличивается. Начиная с $H \approx 6$, фронт наклоняется настолько сильно, что его стационарное распространение с постоянным наклоном становится невозможным и возникает осциллирующий режим (рис. 3, *a*). Механизм этих осцилляций можно описать следующим образом. При большом наклоне теплопроводность не может обеспечить равенство скоростей распространения опережающей и отстающей областей фронта горения. Из-за этого наклон фронта постепенно растет, в результате чего образуется достаточно узкая протяженная вертикальная область слоя с несгоревшим твердым реагентом и более высокой температурой по отношению к средней температуре по данному горизонтальному сечению (на рисунке – слева). В результате основной поток газа протекает по более холодной части сечения слоя и скорость реакции в соседней прогретой части сечения падает. Соответственно, протяженность фронта в вертикальном направлении возрастает. По мере приближения потока газа к лидирующей области фронта вновь происходит выравнивание потока по сечению, поступление газа в область неполного сгорания топлива увеличивается, происходит ускорение горения твердого топлива в ней. Фронт горения искривляется и формирует в рассматриваемой области новый очаг. За счет периодического пропуска не полностью сгоревшей области происходит компенсация постоянной разности скоростей частей фронта. Таким образом, нижняя граница фронта движется рывками, оставляя после себя характерную дорожку из пятен с низкой конверсией твердого топлива (см. рис. 3, *a*, $H = 8,0$).

Когда ширина слоя более чем в два раза превышает минимальное значение ширины наклонного фронта ($H = 8,0$), установление наклонного фронта является не единственным возможным результатом развития неустойчивости. При симметричном возмущении начальных условий образуется куполообразная структура волны горения, состоящая из двух наклонных фронтов, смыкающихся на оси слоя своими опережающими частями (рис. 3, *б*).

Дальнейшее увеличение ширины пористого слоя приводит к появлению структур волны горения, являющихся различными комбинациями описанных выше элементов фронта. Так, при $H = 12,0$ возможно существование как стационарной куполообразной двухфронтной структуры с лидирующей центральной частью (так же как на рис. 3, *б*), так и неустойчивой двухфронтной структуры с отстающей центральной частью, которая затем распадается на два очага горения. Как показал опыт численных расче-

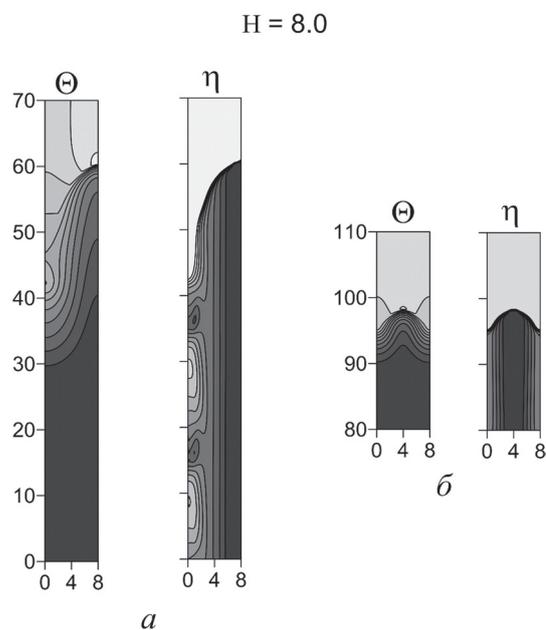


Рис. 3. Осциллирующий наклонный фронт горения (*a*) и куполообразная структура, образованная двумя наклонными фронтами, смыкающимися лидирующими зонами на оси слоя (*б*). Расчетные безразмерные параметры: $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,077$, $\delta = 1,5$, $\Gamma_0 = 2,0$

$H = 24.0$

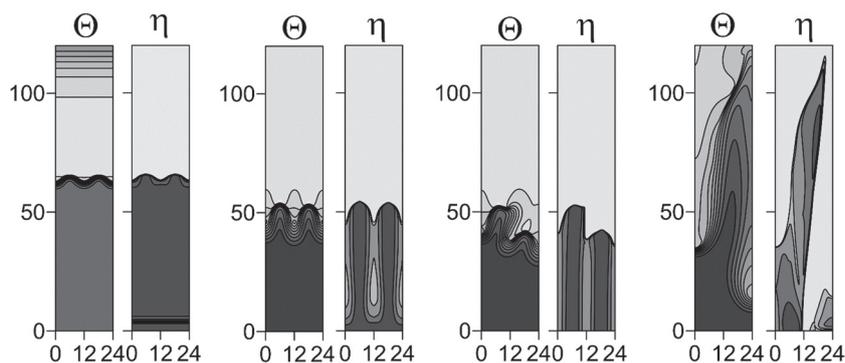


Рис. 4. Иллюстрация распада волнообразного фронта ФГТТ в случае широкого пористого слоя. Расчетные безразмерные параметры: $\gamma = 0,2$, $\beta = 0,077$, $\delta = 1,5$, $\Gamma_0 = 2,0$, $H = 24,0$

тов в широком диапазоне параметров, вариант двухволновой структуры с лидирующей центральной частью обладает существенно большей устойчивостью, чем вариант с лидирующими краями. В случае осциллирующих отстающих областей фронта последний вариант ведет к распаду фронта на отдельные очаги горения и последующему погасанию.

Идея сведения сложной структуры волны фильтрационного горения после развития неустойчивости плоского фронта к суперпозиции нескольких простых наклонных фронтов является достаточно плодотворной. В частности, это иллюстрирует ситуация спонтанного развития неустойчивости плоского фронта горения широкого пористого слоя ($H = 24,0$, рис. 4). В результате потери устойчивости образуется волнообразный фронт горения, состоящий из четырех наклонных фронтов, причем два центральных наклонных фронта образуют V-образную конфигурацию, смыкаясь вблизи оси слоя своими отстающими зонами. Выше отмечалось, что такая конфигурация является в большинстве случаев неустойчивой. Анализируя результаты расчетов можно прийти к выводу, что для достаточно широких пористых слоев спутная инверсная волна ФГТТ оказывается практически всегда неустойчивой – независимо от начальных условий волна горения распадается на погасающие очаги.

Заключение. В работе качественно определены типы развития тепло-гидродинамической неустойчивости плоского фронта спутных волн ФГТТ в зависимости от основных безразмерных параметров процесса – удельного расхода газа и ширины пористого слоя; показано, что результатом развития неустойчивости может быть простой наклонный фронт, наклонный фронт с осциллирующей отстающей зоной, а также различные суперпозиции указанных случаев; для широких пористых слоев потеря устойчивости плоского фронта горения чаще всего приводит к распаду волны горения на очаги и погасанию; на тип эволюции волны горения может влиять симметрия начального возмущения плоского фронта горения; фильтрационное горение твердых топлив в области с неустойчивым плоским фронтом приводит либо к значительному снижению конверсии топлива, либо к полному прекращению процесса.

Литература

1. Манелис Г. Б., Глазов С. В., Салганский Е. А., Лемперт Д. Б. // Успехи химии. 2012. Т. 81, № 9. С. 855–873.
2. Салганская М. В., Кислов В. М., Глазов С. В., Салганский Е. А. // XXIV научная конференция стран СНГ «Дисперсные системы», 20–24 сент. 2010, Украина, Одесса. Одесса, 2010. С. 251–252.
3. Салганская М. В., Кислов В. М., Глазов С. В. и др. // Третья конференция по фильтрационному горению, 18–21 июня, 2013, Черногоровка. Черногоровка, 2013. С. 112–115.
4. Минаев С. С., Потытняков С. И., Бабкин В. А. // ФГВ. 1994. № 1. С. 49–54.
5. Kennedy L. A., Fridman A. A., Saveliev A. V. // J. Fluid Mech. Research. 1996. Vol. 22, N 2. P. 1–26.
6. Dobrego K. V., Zhdanok S. A., Zaruba A. I. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. Vol. 44. P. 2127–2136.
7. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 241, № 1. С. 72–75.
8. Алдушин А. П., Сеплярский Б. С. // Докл. АН СССР. 1979. Т. 249, № 3. С. 585–588.
9. Алдушин А. П., Мержанов А. Г. // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах: сб. науч. тр. / отв. ред. Ю. Ш. Матрос. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1988. С. 9–52.

O. S. RABINOVICH, A. I. MALINOUSKI

orabi@hmti.ac.by

STABILITY OF PLANE FRONT OF SOLID FUEL FILTRATION COMBUSTION

Summary

Analysis of thermal-hydrodynamic instability of plane filtration combustion front of solid fuel is performed. The boundaries of stable region for co-flow combustion wave are determined by numerical modeling. Possible scenarios of plane combustion front evolution to new steady-state or oscillating structures are investigated. The results are expressed in terms of dimensionless parameters.