Effect of Melt Viscosity on the Regression Rate of Low-Melting Materials in a Hot Gas Flow

S. E. Yakush, S. A. Rashkovskiy, V. A. Usanov

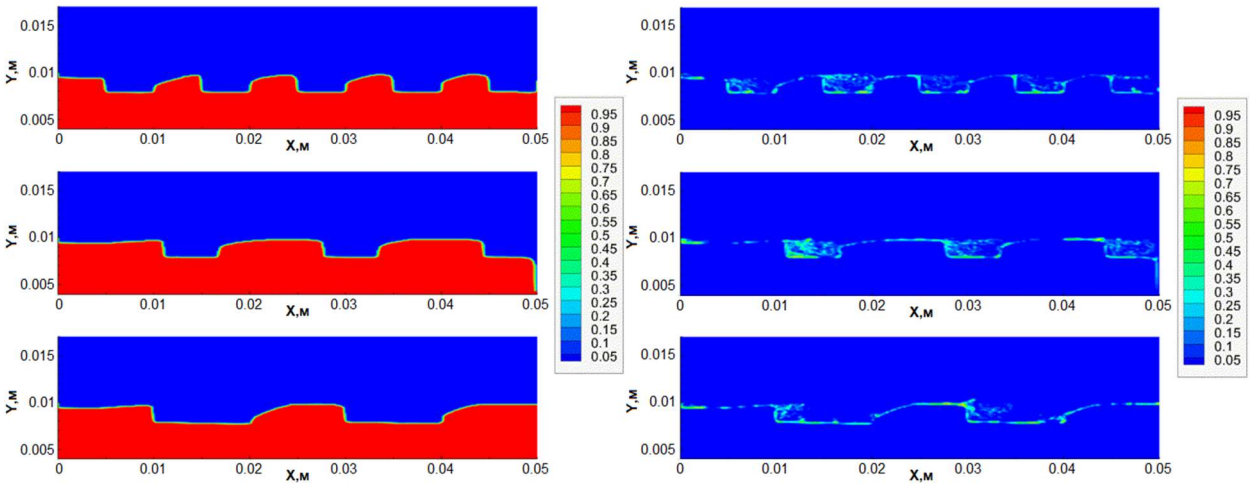
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Moscow, 119526, Russia

yakush@ipmnet.ru, rash@ipmnet.ru,
usanov@ipmnet.ru

Abstract

The results of numerical modeling of the formation and evolution of a melt layer on the surface of a material exposed to a gas flow at a temperature exceeding the melting point are presented. The influence of melt viscosity on the interaction characteristics is considered, including the rate of material regression due to melting followed by flow along the sample surface and entrainment during droplet shedding. Arrhenius-type approximation curves are constructed for three temperature-dependent viscosity curves, generalizing literature data. Calculations of flow and melting over a flat surface and a periodic (steps, depressions) relief are performed, and the results are summarized as exponential dependences of the regression rate on melt viscosity.

Keywords: multiphase flow, melting, VOF, Kelvin-Helmholtz instability, regression.



Regression of low-melting material (left) and melt formation (right) in a hot gas flow

УДК 536.421.1

Влияние вязкости расплава на скорость регрессии легкоплавких материалов в потоке горячего газа

С. Е. Якуш, С. А.Рашковский, В. А. Усанов

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

yakush@ipmnet.ru, rash@ipmnet.ru,
usanov@ipmnet.ru

Аннотация

Представлены результаты численного моделирования образования и эволюции слоя расплава на поверхности материала, находящегося в потоке газа с температурой, превышающей температуру плавления. Рассмотрено влияние вязкости расплава на характеристики взаимодействия, включая скорость регрессии материала за счет плавления с последующим течением вдоль поверхности образца и уноса при срыве капель. Построены аппроксимационные зависимости аррениусовского типа для трех зависимостей вязкости от температуры, обобщающие литературные данные. Проведены расчеты обтекания и плавления плоской поверхности и периодического (уступы, впадины) рельефа, результаты обобщены в виде показательных зависимостей скорости регрессии от вязкости расплава.

Ключевые слова: многофазное течение, плавление, VOF, неустойчивость Кельвина – Гельмгольца, регрессия.

1. Введение

Легкоплавкие материалы, способные к переходу в жидкое состояние при обдуве потоками горячего газа, представляют интерес в различных технических приложениях – при обработке полимерных материалов на производствах, уничтожении отходов. Расплав в образующейся на поверхности обдуваемого материала тонкой пленке течет под действием сдвиговых напряжений со стороны потока газа, при этом развитие неустойчивости кельвина-Гельмгольца приводит к возмущению свободной поверхности расплава, формированию волн и срыву дисперсных фрагментов. В результате протекающих процессов взаимодействия часть материала оказывается захваченной потоком газа, при этом механизм вовлечения материала в газовый поток носит многофазный гидродинамический характер, в отличие от преимущественно диффузионного механизма перемешивания при испарении или газификации материала.

Интерес к процессам взаимодействия горячего газового потока с легкоплавкими материалами во многом продиктован возможностью использования таких материалов в качестве топлива в гибридных ракетных двигателях [1, 2]. Быстрое смешение диспергированного расплава с газовым потоком позволяет преодолеть одну их основных проблем гибридных двигателей – низкую скорость регрессии топлива, обусловленную частичным блокированием поступающего к поверхности горения теплового потока оттекающими газами [3].

Одним из материалов, получивших наибольшее распространение в научных исследованиях процессов применительно к гибридным ракетным двигателям, является парафин, представляющий собой твердое углеводородное вещество с высокой теплотой сгорания и низкой

температурой плавления [4]. Было экспериментально показано, что топлива на основе парафина могут давать скорость регрессии, в 3–5 раз превосходящую этот показатель для газифицирующихся (терморазлагаемых) топлив, таких как ПММА [5]. В то же время, продолжается поиск других топлив, представляющих собой смесь парафина с полимерами и другими веществами, улучшающими его эксплуатационные свойства, во всем мире проводятся активные экспериментальные исследования плавления, зажигания и горения парафина и композиций на его основе в условиях обдува горячим воздухом и более активными окислителями (например, чистым кислородом) детально исследуются процессы, протекающие на поверхности образца [6–11].

Важное значение для исследования процессов взаимодействия легкоплавких веществ с потоком горячего газа имеет развитие вычислительных моделей протекающих при этом взаимосвязанных процессов. Примерами численного моделирования процессов таких взаимодействий для газифицирующихся топлив служат работы [12–14], тогда как модели, учитывающие плавление и диспергирование парафина и других легкоплавких топлив, использованы в работах [11, 15–18]. Следует отметить, что при моделировании процессов, протекающих на поверхности легкоплавких топлив необходимо учитывать целый спектр тесно взаимосвязанных процессов – наличие межфазных границ, фазовые переходы, испарение вещества, горение в турбулентном газовом потоке и др. В полном объеме эта задача до сих пор не решена, поэтому идет активная разработка и адаптация имеющихся моделей и численных методов.

В настоящей работе проведено дальнейшее развитие вычислительной модели взаимодействия потока горячего газа с поверхностью легкоплавкого материала, предложенной в работах [15, 16]. Исследовано влияние переменности вязкости расплава, которая сильно зависит от температуры, на скорость регрессии (уменьшения массы твердого вещества). Рассмотрен обдув горячим газом как изначально плоской поверхности, так и поверхности, имеющей периодические выступы и впадины прямоугольной формы.

2. Модель плавления парафина в потоке воздуха

2.1. Модель многофазного течения при взаимодействии воздуха с легкоплавким материалом

Для описания взаимодействия легкоплавкого вещества с потоком нагретого газа используется математическая модель, представленная в работах [15, 16]. Ниже приведены определяющие уравнения модели и описан метод их решения. Модификации данной модели, выполненные в настоящей работе, касаются введения переменной вязкости расплава, они изложены в следующем разделе.

В рассматриваемой задаче можно выделить три подобласти – газ, расплав парафина и твердый парафин. Границы между подобластями являются подвижными, при этом граница между твердым и жидким парафином является фронтом плавления, а граница расплава с газом разделяет две несмешивающихся жидкости, где свою роль играет сила поверхностного натяжения.

Для описания указанной многофазной системы применяется метод VOF (Volume of Fluid), в котором резкие физические границы заменяются узкими переходными зонами между областями, заполненными одной из фаз [19, 20]. Описание движения фаз осуществляется отслеживанием пространственных распределений их объемных долей. Для рассматриваемой задачи удобно рассматривать две фазы – парафин (с объемной долей α) и газ (с объемной долей $1-\alpha$), а для парафина также ввести массовую долю твердого вещества χ, равную 1 в твердом веществе и 0 в чистом расплаве.

В соответствии с методом VOF, рассматривается течение некоторой эффективной жидкости, свойства которой определяются как средневзвешенные по объемной доле:

$$\rho = \alpha\rho_f + (1-\alpha)\rho_g, \tag{1}$$

$$\rho h = \alpha \rho_f h_f + (1-\alpha)\rho_g h_g , \tag{2}$$

$$\eta = \alpha \eta_f + (1-\alpha)\eta_g , \tag{3}$$

$$\lambda = \alpha \lambda_f + (1-\alpha)\lambda_g \tag{4}$$

Здесь ρ – плотность; h удельная энтальпия; η – динамическая вязкость; λ – теплопроводность; нижние индексы f и g относятся к материалу и газу, соответственно. Плотность материала определяется как $\rho_f^{-1} = \chi \rho_l^{-1} + (1-\chi)\rho_s^{-1}$, где ρ_s и ρ_l – плотности в твердом и жидком состояниях. В дальнейшем пренебрегается изменением плотности при плавлении: $\rho_f = \rho_l$. Коэффициенты вязкости и теплопроводности материала вычисляются как $\lambda_f = \chi \lambda_s + (1-\chi)\lambda_l$ и $\eta_f = (1-\chi)\eta_l$, зависимость удельной энтальпии материала от температуры определяется по соотношению

$$h_f(T) = \begin{cases} c_s T, & T \le T_s, \\ c_s T_s + \Delta H_m \xi(T), & T_s \le T \le T_l, \\ c_s T_s + \Delta H_m + c_l (T - T_l), & T \ge T_l, \end{cases} \tag{5}$$

где c_s и c_l – удельные теплоемкости в твердом и жидком состояниях; ΔH_m – удельная теплота плавления; T_s и T_l – солидус и ликвидус; $\xi(T) = (T - T_s)/(T_l - T_s)$ – интерполирующая функция. Для чистого вещества $T_s = T_l = T_m$ (температура плавления), однако при численной реализации принимается $T_s = T_m - \Delta T/2$, $T_l = T_m + \Delta T/2$, где $\Delta T \sim 1$ K, что позволяет избежать появления разрывной функции. Уравнение (5) позволяет по энтальпии h_f однозначно определить температуру T и далее найти массовую долю твердого материала:

$$\chi = \min\left(\max\left[\xi(T), 0\right], 1\right) \tag{6}$$

Свойства газовой фазы (ρ_g, η_g, c_p) в настоящей работе приняты постоянными и соответствующими среднего давлению P и температуре газа на входной границе T_{in}.

В рамках сделанных предположений система определяющих уравнений для эффективной жидкости имеет вид

$$\nabla \mathbf{U} = 0 , \tag{7}$$

$$\rho \frac{\mathrm{d}\mathbf{U}}{\mathrm{d}t} = -\nabla p + \nabla \boldsymbol{\tau} - C_s \chi \mathbf{U} , \tag{8}$$

$$\rho \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} = \nabla\left(\lambda_{eff} \nabla T\right), \tag{9}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + (\mathbf{U}\nabla)\alpha = 0 \tag{10}$$

В уравнении (8) p – отклонение давления от среднего давления P; $\boldsymbol{\tau} = \eta_{eff}\left(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T\right)$ – тензор вязких напряжений, последний член в правой части (8) предназначен для подавления движения материала до начала плавления; $C_s \gg 1$ – модельная константа. Эффективная вязкость $\eta_{eff} = \eta + \eta_t$ и теплопроводность $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$ учитывают турбулентные составляющие; в настоящей работе, в соответствии с [15, 16], принималось $\eta_t = 10^{-3}$ Па·с в газовой фазе и $\eta_t = 0$ в расплаве, $\lambda_t = c_p \eta_t / \mathrm{Pr}_t$, где $\mathrm{Pr}_t = 0.7$ – турбулентное число Прандтля. Отметим, что

попытка непосредственного переноса на «эффективную жидкость» в рамках VOF моделей турбулентности класса RANS не увенчалась успехом, поскольку при этом получались завышенные значения теплопроводности в слое расплава, приводившие к чрезмерно быстрому плавлению. По-видимому, это происходит из-за того, что в слой расплава при таком формальном подходе получается турбулентным, т.е. обладающим завышенной теплопроводностью. Корректная аппроксимация уравнений для турбулентных характеристик в такой геометрии требует специального исследования.

Численная реализация и метод решения уравнений математической модели (7)–(10) рассмотрены в работах [15, 16]. Используется двумерная постановка задачи, аппроксимация осуществляется на декартовых неравномерных сетках методом конечного объема с аппроксимациями MUSCL второго порядка точности с ограничителями потоков для обеспечения монотонности решения, совместное решение нестационарных уравнений производится известной схемой PISO.

Ключевую роль в методе VOF имеет аппроксимация уравнения (10) для объемной доли α: применяемая схема не должна приводить к «размазыванию» границы раздела фаз на больших промежутках времени. В настоящей работе использовался метод THINC, предложенный в работе [21], относящийся к классу алгебраических методов и не требующий геометрической реконструкции поверхности раздела фаз.

2.2. Температурная зависимость вязкости расплава

Зависимость вязкости расплава от температуры описывается формулой аррениусовского вида с параметрами, подобранными так, чтобы аппроксимировать наилучшим образом литературные данные. Именно, динамическая вязкость расплава задается формулой

$$\eta_m(T) = A\exp\left(\frac{B}{RT}\right), \tag{11}$$

где A и B – настраиваемые константы, R – универсальная газовая постоянная.

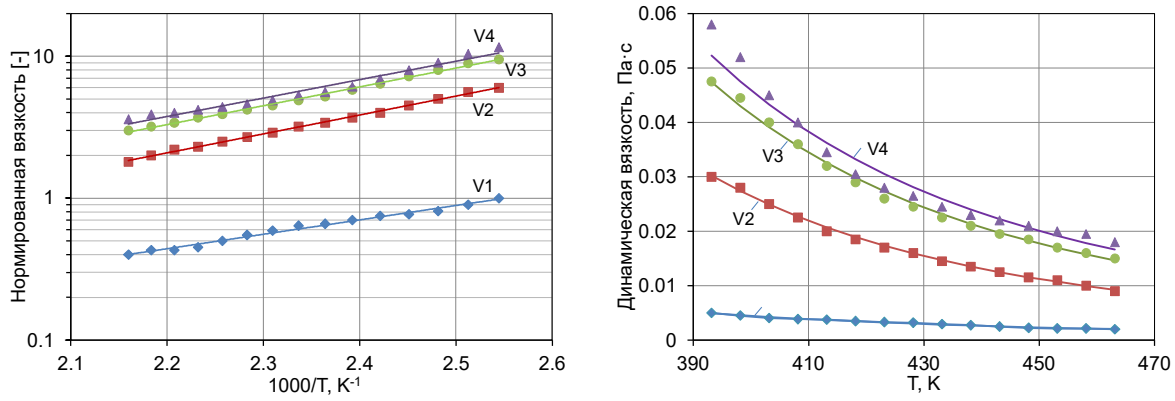
В расчетах рассмотрены три легкоплавких вещества, свойства которых аппроксимированы формулой: вещество V1 представляет собой чистый парафин, тогда как V2–V4 представляют собой смеси парафина с полимером в количестве от 2.5 % до 5 %, соответственно. Параметры аррениусовской зависимости (11) подбирались методом наименьших квадратов по экспериментальным данным, приведенным в работе [7]. В табл. 1 приведены найденные значения констант.

Таблица 1

Параметры аррениусовской зависимости для плотности расплава

Вещество	Описание	A, Па·с	B, Дж/моль·К
V1	Парафин	1.3×10^{-5}	1.94×10^{4}
V2	Парафин с добавкой 2.5 % полимера	1.2×10^{-5}	2.56×10^{4}
V3	Парафин с добавкой 4 % полимера	2.0×10^{-5}	2.54×10^{4}
V4	Парафин с добавкой 5 % полимера	2.65×10^{-5}	2.48×10^{4}

На рис. 1, *а*, *б* построены соответствующие графики, подтверждающие хорошее соответствие аппроксимирующих функций (11) экспериментальным данным [7].



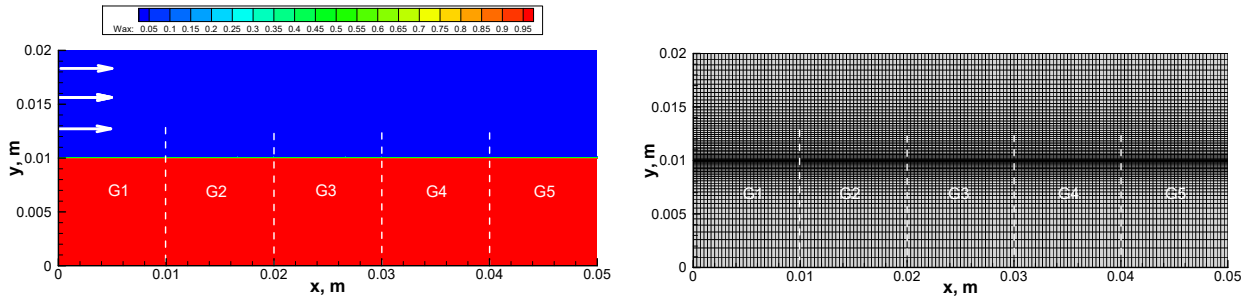
а) *б*)

Рис. 1. Аппроксимация экспериментальных данных [7] по вязкости расплава: *а*) нормированная вязкость; *б*) абсолютная динамическая вязкость

3. Параметры расчета

Расчеты проводились при скоростях потока 50 и 100 м/с, температуре на входе $T_{in} = 1500$ K и давлении $P = 8.5$ бар, плотность газа на входе составляла 5.3 кг/м^3.

Основное внимание в данной работе уделяется детальному изучению влияния переменной вязкости расплава на характеристики расплавленного слоя, что предъявляет повышенные требования к пространственному разрешению сетки для учета изменений свойств расплава в слое расплава. Моделирование проводилось в области размером 50×20 мм, показанной на рис. 2, *а*. Расчетная сетка, также показанная на рис. 2, *б*, была неравномерной, с наименьшим размером ячейки 0.1 мм.



а) *б*)

Рис. 2. Расчетная область (*а*) и неравномерная декартова сетка со сгущением в области границы легкоплавкого материала (*б*)

Скорость регрессии измерялась на пяти интервалах длиной 10 мм каждый, эти интервалы ниже именуются G1–G5 (см. рис. 2). Для определения скорости регрессии вычислялись средний уровень плавящегося материала Y_f и средний уровень твердого материала Y_s:

$$Y_f = \frac{1}{x_R - x_L} \int_0^H \int_{x_L}^{x_R} \alpha(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\,, \tag{12}$$

$$Y_s = \frac{1}{x_R - x_L} \int_0^H \int_{x_L}^{x_R} \alpha(x,y)\chi(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\,, \tag{13}$$

где x_L и x_R – границы интервала осреднения (G1–G5), H – высота расчетной области. Средняя толщина слоя расплава определялась затем как

$$l_m = Y_f - Y_s \tag{14}$$

На рисунке 3, а также в таблице 2 представлены границы расчетной области и их тип.

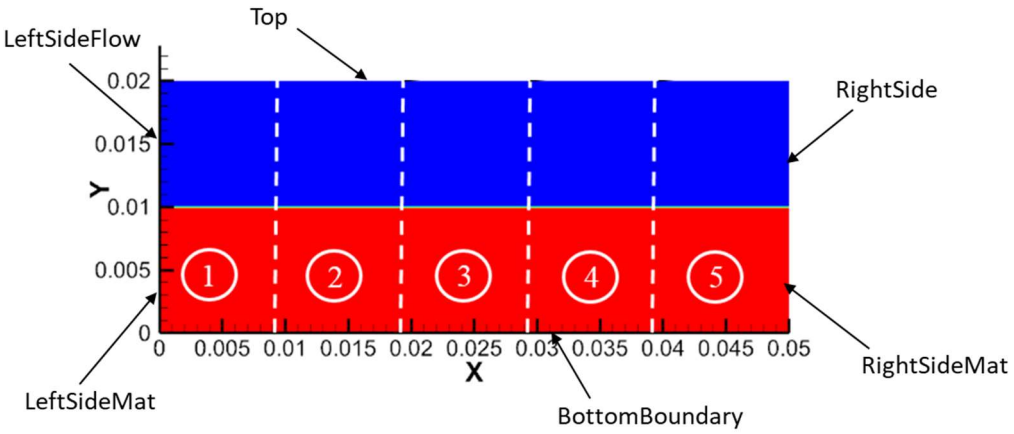


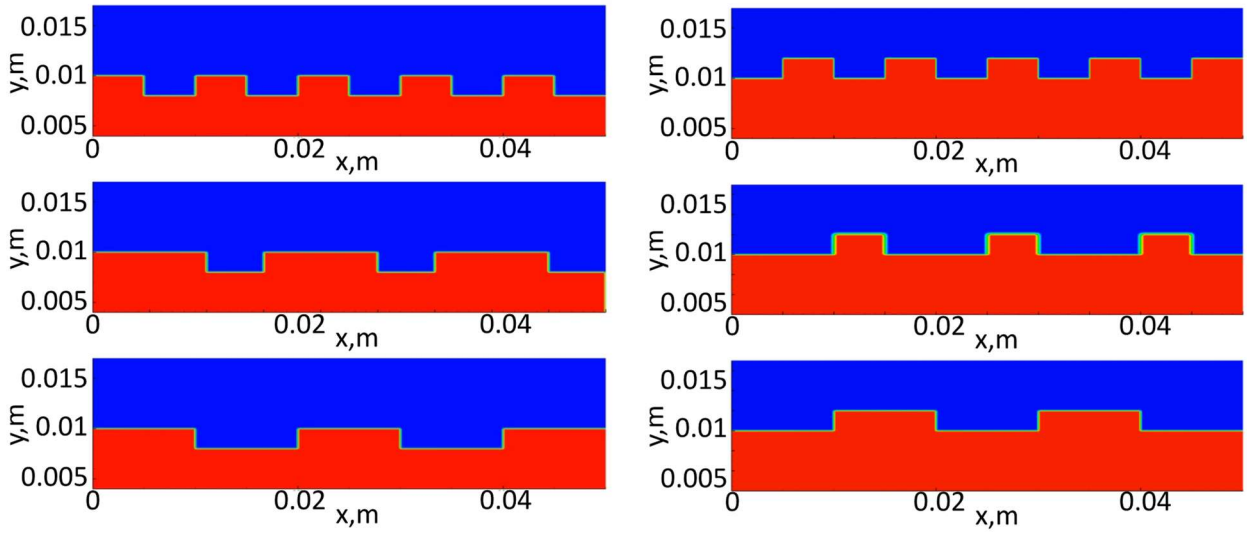
Рис. 3. Расчетная область с границами

Таблица 2

Типы границ расчетной области

№	Название границы	Тип границы
1	LeftSideMat	Стенка
2	LeftSideFlow	Входная граница с заданной скоростью
3	RightSideMat и RightSide	Выходная граница с заданным давлением
4	BottomBoundary	Стенка
5	Top	Свободное проскальзывание

Наряду с изучением регрессии изначально плоской поверхности материала, интерес представляло определение скорости регрессии при наличии на поверхности периодических неровностей в виде выступов/впадин различных длин и высот. Для решения данной задачи использовались начальные условия, показанные на рис. 4, с впадинами размерами 5 × 2 мм и 10 × 2 мм с периодами равными 5 мм и 10 мм, а также с выступами таких же размеров.



а) *б*)

Рис. 4. Расчетная область с впадинами (*а*) и с выступами (*б*)

4. Результаты расчетов

4.1. Регрессия материала с изначально плоской поверхностью

На рис. 5 и 6 представлены распределения объемной доли всего материала (твердого и жидкого) α и расплава $\alpha(1-\chi)$ в два характерных момента времени, полученные в расчетах для вариантов зависимости вязкости от температуры V1 (наименьшая вязкость) и V3 (наибольшая вязкость), входная скорость в расчетах составляла 50 м/с. Видно, что наиболее быстрая регрессия материала происходит вблизи входной границы вследствие образования здесь рециркуляционной зоны, при этом более низкая вязкость расплава способствует боле быстрому распространению «выемки» вдоль поверхности материала. Слой расплава является достаточно тонким, на нем хорошо видны волны и срывающиеся фрагменты.

Более детально регрессия материала с вязкостями V1–V3 представлена на рис. 7, где построены зависимости средней высоты расплава и твердого материала (13), (14) для подобластей G1–G5.

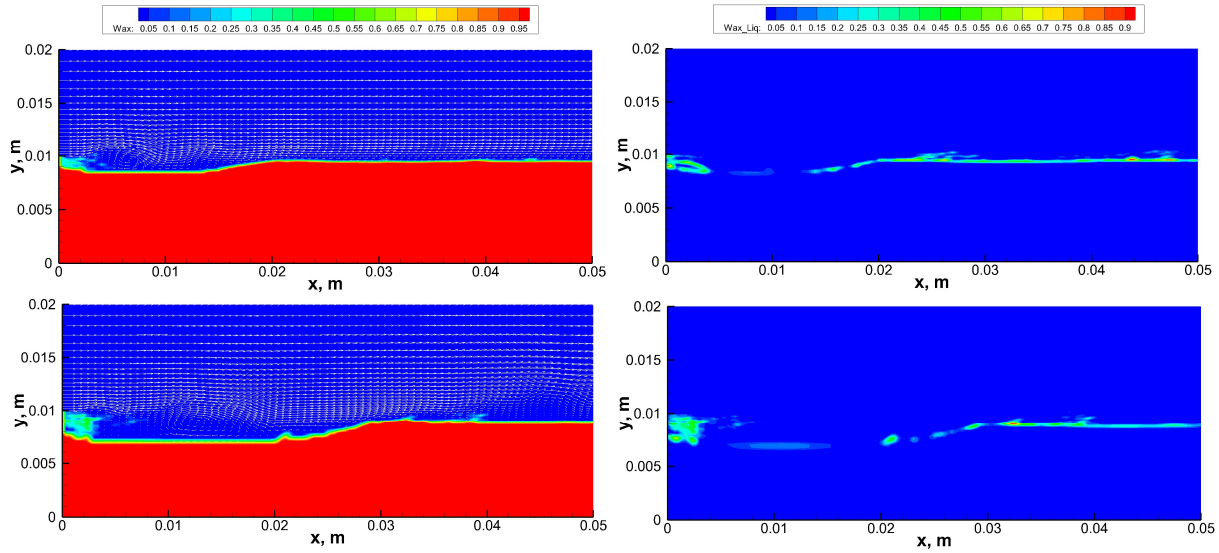


Рис. 5. Объемная доля материала (слева) и расплава (справа) для варианта V1 в моменты времени $t = 0.2$ и 0.4 с

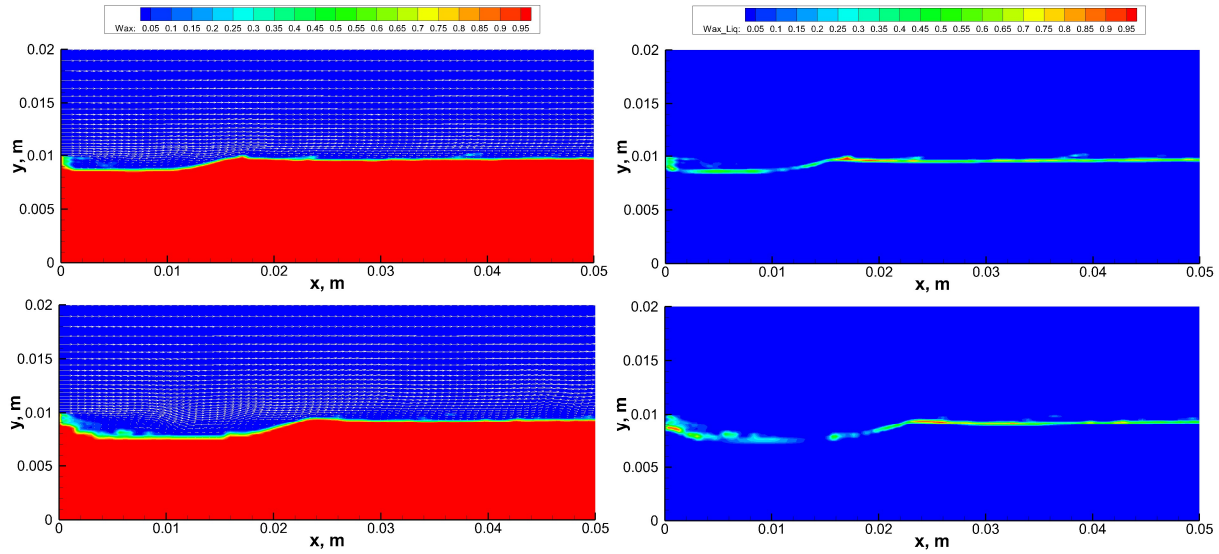
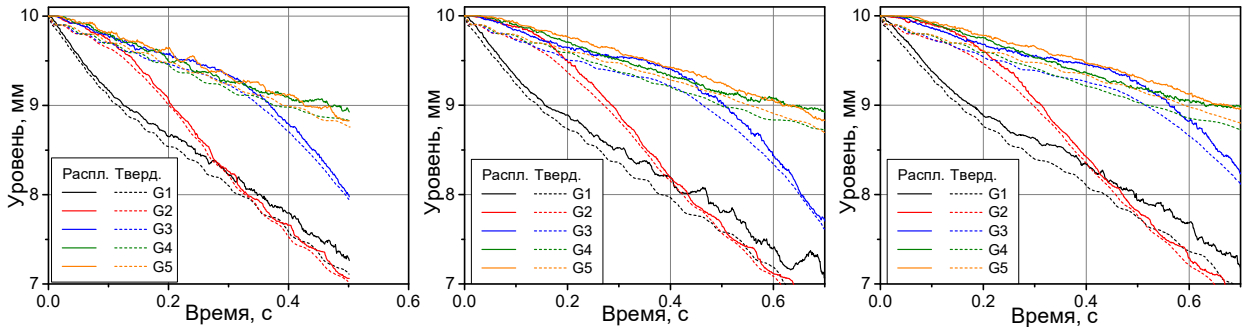


Рис. 6. Объемная доля материала (слева) и расплава (справа) для варианта V3 в моменты времени $t = 0.2$ и 0.4 с

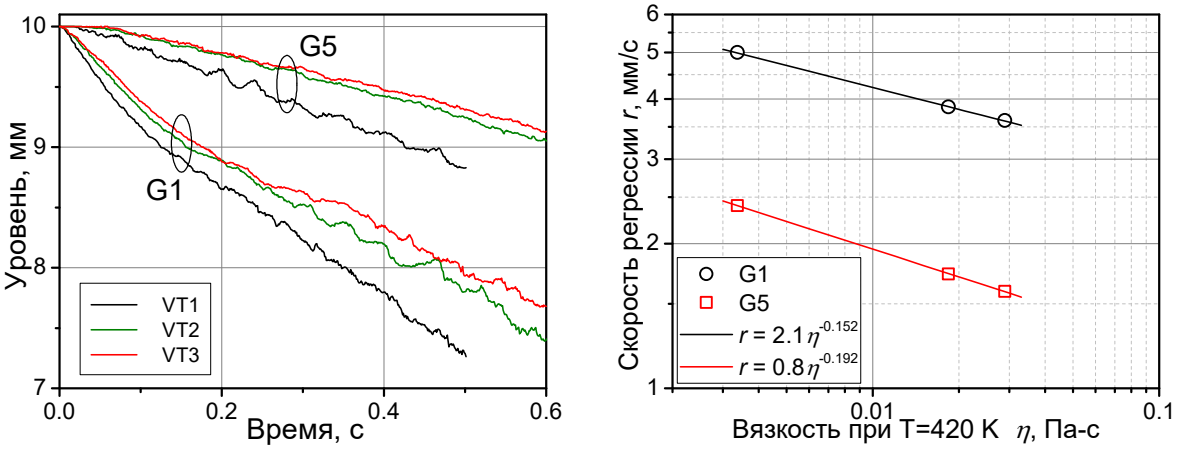


а) *б*) *в*)

Рис. 7. Регрессия материала на участках G1–G5 при скорости газа 50 м/с: (*а*) вязкость V1, (*б*) вязкость V2, (*в*) вязкость V3

Для более детального выявления эффекта вязкости расплава, на рис. 8, *а* построены зависимости от времени для уровня материала (включая твердое вещество и расплав), а также построена зависимость скорости регрессии r для двух интервалов (G1 и G5) от характерного значения вязкости η, взятого при температуре $T = 420$ K. Видно, что более низкая вязкость расплава обеспечивает более высокую скорость регрессии, что в первую очередь обусловлено более высокой подвижностью расплава, который течет вдоль поверхности материала. Менее вязкий расплав образует более тонкую пленку, обеспечивая лучший прогрев твердого материала со стороны горячего газа, что способствует более быстрому его плавлению.

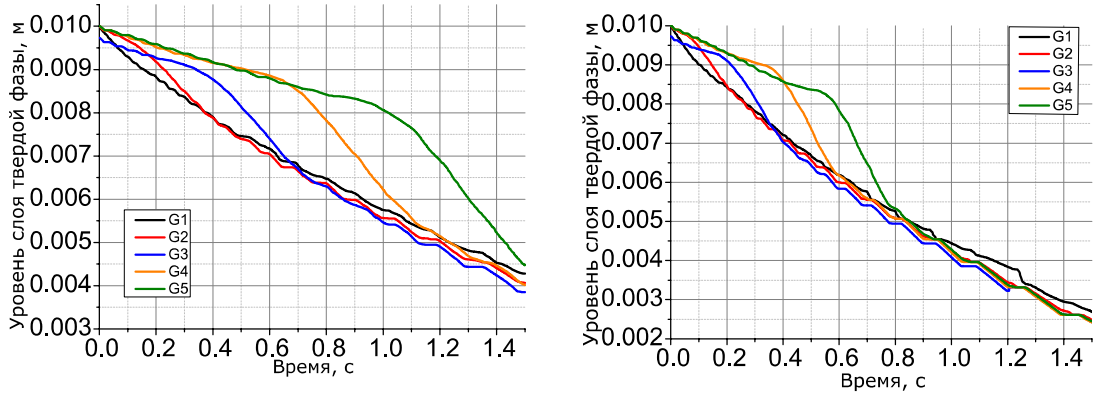
На рис. 8, *б* построены полиномиальные аппроксимации зависимостей скорости регрессии от вязкости. Эти аппроксимации хорошо коррелируют с экспериментальной зависимостью $r = 0.98\eta^{-0.223}$, полученной в работе [7].



а) *б*)

Рис. 8. Сравнение уровней расплава при различной вязкости (*а*), степенные аппроксимации зависимостей скорости регрессии от вязкости (*б*)

Сравнение результатов численного моделирования обдува легкоплавкого материала потоком горячего газа при скоростях 50 м/с и 100 м/с при вязкости расплава V1 показывает, что скорость регрессии топлива увеличивается пропорционально увеличению скорости газового потока, т.е. практически в два раза (рис. 9). Видно, что регрессия материала происходит неравномерно, она носит характер «волны», распространяющейся по поверхности твердой фазы. В случае с меньшей скоростью потока газа «волна» имеет большую высоту и распространяется медленнее, в то время как при большей скорости потока скорость распространения «волны» также в два раза выше.

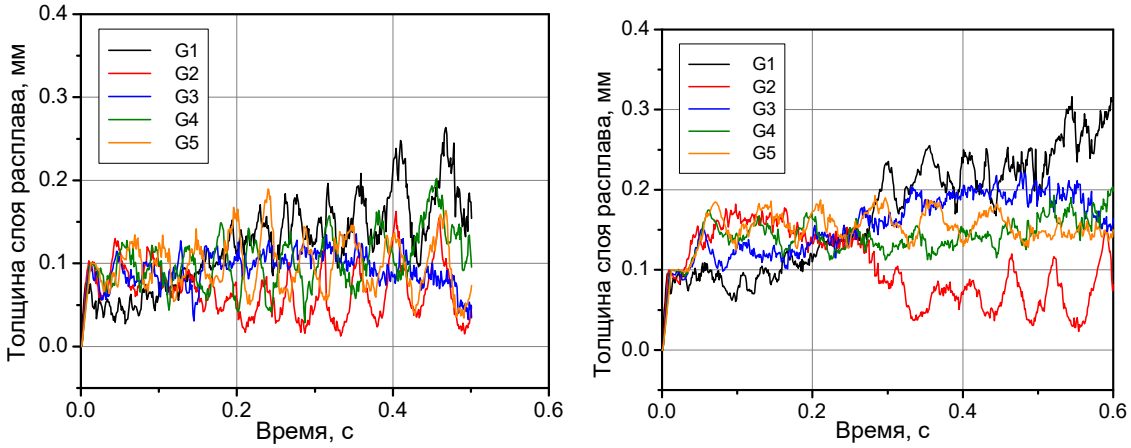


а) *б*)

Рис. 9. Регрессия топлива (вязкость V1) при скорости газового потока 50 м/с (*а*) и 100 м/с (*б*)

Наконец, рассмотрим полученные в расчетах данные по толщинам пленки расплава, образующейся на поверхности легкоплавкого материала. На рис. 10, *а*, *б* для различных интервалов вдоль образца G1–G5 представлены зависимости от времени для величин l_m, определенных в соответствии с уравнением (14).

Общая тенденция, заметная на рис. 10, состоит в том, что толщина слоя расплава l_m увеличивается с увеличением вязкости расплава, что также согласуется с отмеченными выше результатами. На графиках отчетливо видны периодические колебания толщины расплава с периодом около 0.05 с. Эти колебания связаны с распространением волн по поверхности слоя расплава, которые имеют квазипериодический характер и соответствуют развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на границе раздела расплав – газ.



а) *б*)

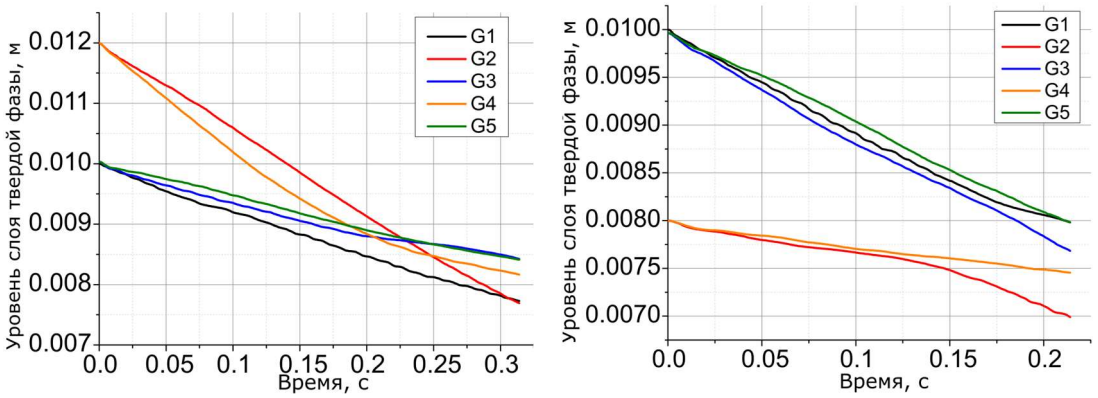
Рис. 10. Толщина слоя расплава на поверхности материала при скорости газового потока 50 м/с: вязкость V1 (*а*) и V3 (*б*)

4.2. Регрессия при обтекании профилированной поверхности материала

Как показывают эксперименты [11], изначально ровная поверхность образца парафина, подверженного воздействию высокотемпературного газового потока, быстро становится неровной, поэтому представляет интерес изучение влияния этого фактора на скорость регрессии. В настоящей работе проведены численные расчеты обтекания газом профилированных поверхностей твердого топлива, вид которых показан на рис. 4, цель этих расчетов состояла в выявлении влияния таких неровностей на скорость регрессии материала, а также в изучении изменения формы неровностей за счет плавления и уноса материала.

На рис. 11, *а*, *б* представлены графики изменения уровня твердой фазы для двух видов поверхностей – с выступами и впадинами размером 1 см. Скорость регрессии выступов выше

в 1.67 раза по сравнению со случаем изначально ровной поверхности материала, который рассматривался в разделе 4.1. При наличии впадин наблюдается существенная разница в скоростях регрессии между участками, достигающая 3 раз.



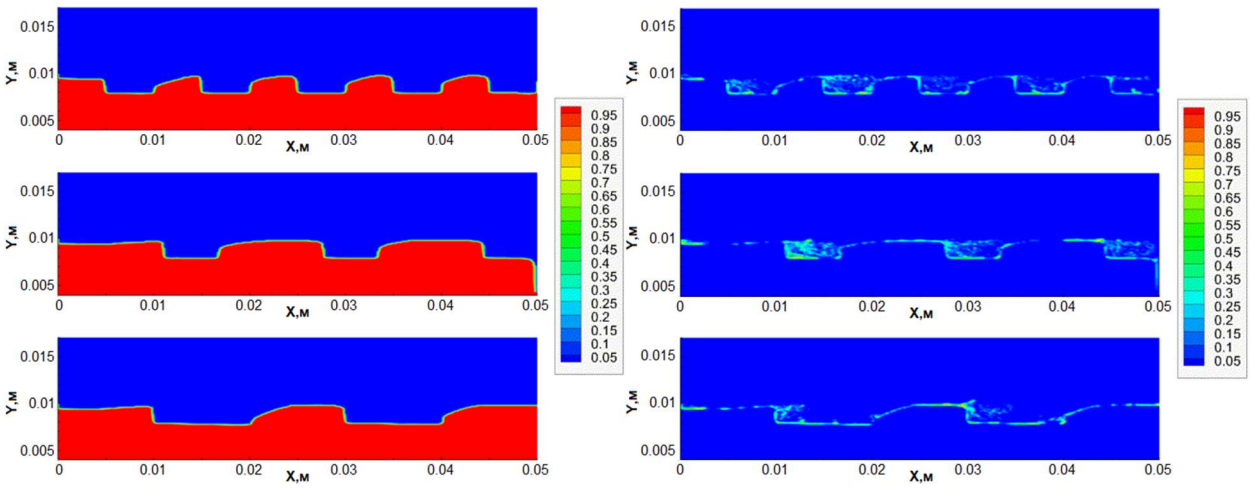
а) *б*)

Рис. 11. Регрессия топлива в случае с выступами с промежутками в 1 см (*а*) и в случае с впадинами с промежутками в 1 см (*б*)

Изменение формы поверхности в процессе плавления материала продемонстрировано на рис. 12 и 13, где приведены распределения объемной доли материала, для различных вариантов неровностей.

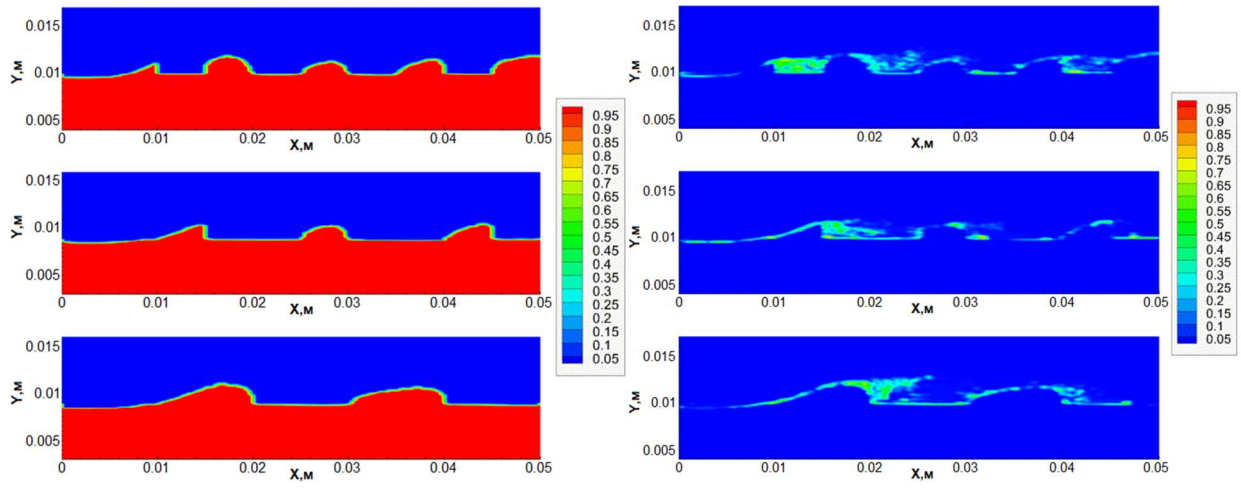
Расчеты показали, что форма профилированной поверхности, а именно, размеры неровностей и их частота, существенно влияет на картину обтекания газом материала и течение расплава вдоль его поверхности. Меньшее расстояние между неровностями позволяет расплавленному материалу перетекать на последующий участок, что препятствует теплообмену между газом и твердым веществом и затрудняет процесс плавлении нового материала. Это приводит к уменьшению скорости регрессии. В то же время, наличие выступов увеличивает диспергирование расплава за счет более интенсивного срыва капель с обдуваемой поверхности.

В совокупности можно сделать вывод, что наличие профилированной поверхности улучшает регрессию топлива как минимум в два раза при той же скорости газового потока 50 м/с, а наличие выступов, а не впадин, увеличивает скорость регрессии топлива еще в 1.5 раза.



а) *б*)

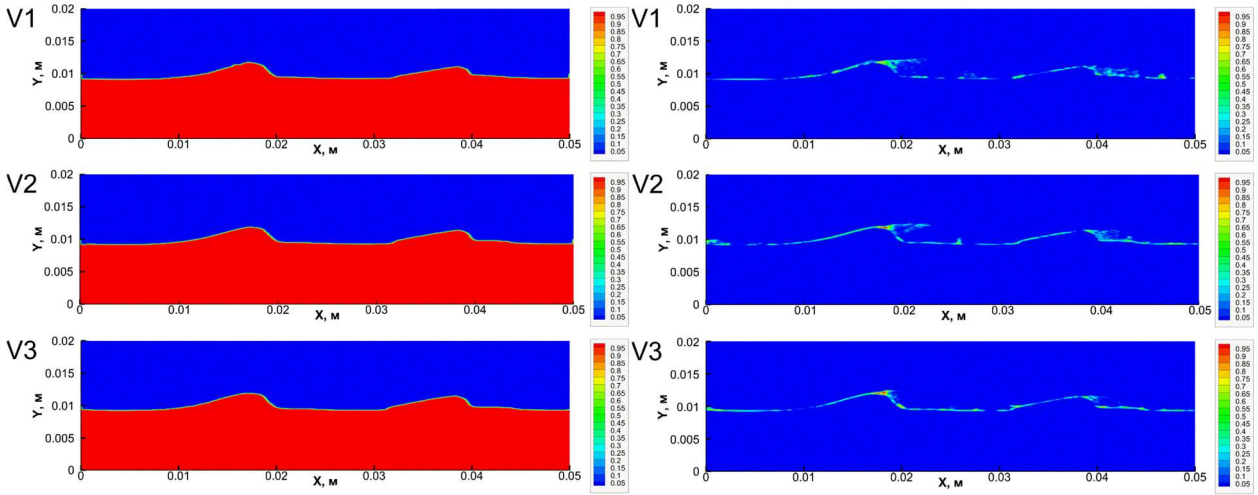
Рис. 12. Распределение объемной доли твердой фазы (*а*) и жидкой фазы (*б*) для момента времени $t = 0.1$ с для различных вариантов впадин при вязкости V1 и скорости газового потока 50 м/с



а) *б)*

Рис. 13. Распределение объемной доли твердой фазы (*а*) и жидкой фазы (*б*) для момента времени $t = 0.1$ с для различных вариантов выступов при вязкости V1 и скорости газового потока 50 м/с

Переходя к результатам моделирования влияния вязкости расплава на регрессию профилированной поверхности, рассмотрим случай с выступами 10×2 мм и расстоянием между ними равным 10 мм. На рис. 14 представлено распределение объемной доли твердой и жидкой фаз в момент времени $t = 0.1$ с для веществ V1–V3 (см. табл. 1). Видно, что жидкая фаза веществ V1 и V2 за счет меньшей вязкости лучше уносится потоком горячего газа, что приводит к интенсификации процесса массообмена и регрессии топлива.



а) *б)*

Рис. 14. Распределение объемной доли твердой фазы (*а*) и жидкой фазы (*б*) для случая с выступами 10×2 мм с периодами равными 10 мм в момента времени $t = 0.1$ с для различных вариантов вязкости жидкой фазы при скорости газового потока 50 м/с

Количественные характеристики расплавленного слоя на поверхности обдуваемого материала представлены на рис. 15 и 16, где приведены временные зависимости для уровня твердой фазы и толщины расплава на поверхности материала.

Как и ранее (см. раздел 4.1), расчеты показывают, что вещество V1 имеет наибольшую скорость регрессии твердого материала. Различие скорости регрессии между веществами V1–V3 составляет не более 10 %, однако для веществ V2 и V3 наблюдается большая толщина слоя расплава на поверхности твердого топлива, чем для вещества V1.

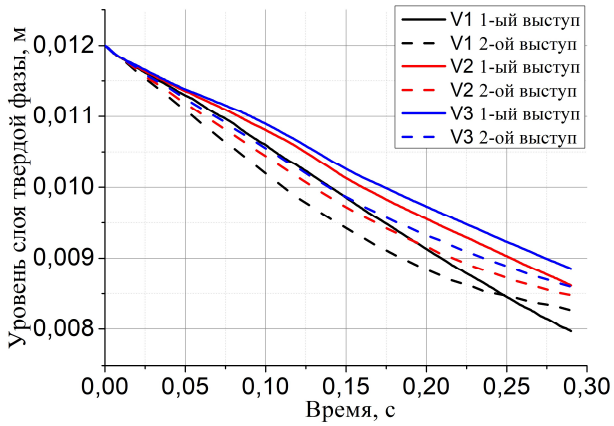


Рис. 15. Сравнение временных зависимостей уровня твердой фазы парафина для двух выступов и трех вариантов вязкости

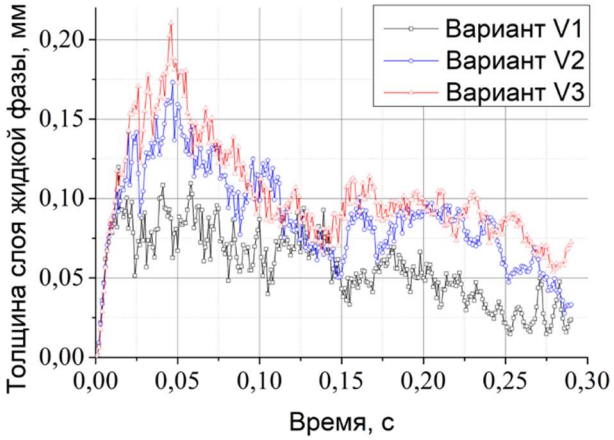


Рис. 16. Изменение толщины расплавленного слоя парафина для различной вязкости жидкой фазы

5. Заключение

Проведенные исследования показали, что созданная вычислительная модель отражает основные особенности взаимодействия легкоплавкого материала (парафина) с горячим газом – образование слоя расплава, его течение, срыв капель с поверхности и унос потоком. Полученные аппроксимации для зависимости скорости регрессии от вязкости расплава хорошо коррелируют с экспериментальными данными, имеющимися в литературе.

Дальнейшее совершенствование вычислительной модели возможно в первую очередь в части более адекватного описания процессов в газе, включая модель турбулентности, а также уравнение состояния и переменные теплофизические свойства газа. Определенный шаг в этом направлении был сделан в предыдущей работе [11], где применялось моделирование методом крупных вихрей.

С прикладной точки зрения, включая проблемы пожаровзрывобезопасности, важное значение будет иметь расширение модели на случай многокомпонентного реагирующего газа. Это позволит учесть такие процессы, как испарение жидкого вещества из расплава, смешение паров с окислителем, а также спонтанное или вынужденное зажигание топливовоздушной смеси.

Благодарности и ссылки на гранты

Исследования проведены в рамках проекта РНФ № 24-19-00703 «Многофазные явления при воздействии горячих газов на легкоплавкие горючие материалы: эксперименты и вычислительные модели»

Литература

1. Calabro M. Overview on hybrid propulsion // Progress in Propulsion Physics. 2011. Vol. 2. Pp. 353–374. DOI: 10.1051/eucass/201102353
2. Okninski A., Kopacz W., Kaniewski D., Sobczak. Hybrid rocket propulsion technology for space transportation revisited – propellant solutions and challenges // Fire Phys. Chem. 2021. Vol. 1, iss. 4. Pp. 260–271. https://doi.org/10.1016/j.fpc.2021.11.015
3. Pastrone D. Approaches to low fuel regression rate in hybrid rocket engines // Int. J. Aerosp. Eng. 2012. Vol. 2012, Article ID 649753. Pp. 1–12. DOI:10.1155/2012/649753
4. Mazzetti A., Merotto L., Pinarello G. Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective // Acta Astronaut. 2016. Vol. 126. Pp. 286–297. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.036
5. Wada Y., Kawabata Y., Kato R., Kato N., Hori K. Observation of combustion behavior of low melting temperature fuel for a hybrid rocket using double slab motor // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2016. Vol. 15. No. 5. Pp. 351–369. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMarerialsChemProp.2017011278
6. Liu X., Hu S., Wang Y., Zhang W., Liu L. Droplet entrainment characteristics of HTPB/Paraffin blended fuels for hybrid rocket motors // Acta Astronaut. 2024. Vol. 214. Pp. 293–302. DOI:10.1016/j.actaastro.2023.10.043
7. Petrarolo A., Kobald M., Schlechtriem S. Optical analysis of the liquid layer combustion of paraffin-based hybrid rocket fuels // Acta Astronaut. 2019. Vol. 158. Pp. 313–322. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.05.059
8. Zarko V., Kiskin A., Cheremisin A. Contemporary methods to measure regression rate of energetic materials: A review // Prog. Energy Combust. Sci. 2022. Vol. 91. Pp. 100980. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100980
9. Kiskin A. B., Zarko V. E., Eremin I. V. Studying the paraffin based mixtures regression under high speed hot air blowing // Acta Astronaut. 2024. Vol. 216. Pp. 330–335. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.01.005
10. Usanov V. A., Gembarzhevskii G. V., Rashkovskiy S. A., Yakush S. E. Melting and regression of paraffin samples in hot air flow // Heat Transfer Research. 2025. Vol. 56. No. 1. Pp. 27–44. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2024056249
11. Сиваков Н. С., Усанов В. А. Экспериментальное и численное исследование плавления парафина под воздействием потока нагретого воздуха // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Т. 25, вып. 7. http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-7/articles/1137/
12. Betelin V. B., Kushnirenko A. G., Smirnov N. N., Nikitin V. F., Tyurenkova V. V., Stamov L. I. Numerical investigations of hybrid rocket engines // Acta Astronaut. 2018. Vol. 144. Pp. 363–370. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.01.009
13. Kushnirenko A. G., Stamov L. I., Tyurenkova V. V., Smirnova M. N., Mikhalchenko E. V. Three-dimensional numerical modeling of a rocket engine with solid fuel // Acta Astronaut. 2021. Vol. 181. Pp. 544–551. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.028
14. Рашковский С. А., Якуш С. Е., Баранов А. А. Моделирование твердотопливного прямоточного воздушно-реактивного двигателя со стабилизатором горения // Горение и взрыв. 2017. Т. 10, № 2. С. 79–84.

15. Rashkovskiy S. A., Yakush S. E. Numerical simulation of low-melting temperature solid fuel regression in hybrid rocket engines // Acta Astronaut. 2020. Vol. 176. Pp. 710–716. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.002
16. Yakush S. E., Rashkovskiy S. A. Modeling of liquefying material interaction with hot gas flow in application to hybrid rocket engines // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2351. No. 1. Pp. 030069. DOI: 10.1063/5.0052253
17. Migliorino M. T., Fabiani M., Paravan C., Bianchi D., Nasuti F., Galfetti L., Pellegrini R. C., Cavallini E. Numerical and experimental analysis of fuel regression rate in a lab-scale hybrid rocket engine with swirl injection // Aerosp. Sci. Technol. 2023. Vol. 140. Pp. 108467. https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108467
18. Carmicino C., Gallo G., Savino R. Self-consistent surface-temperature boundary condition for liquefying-fuel-based hybrid rockets internal-ballistics simulation // Int. J. Heat Mass Transf. 2021. Vol. 169. Pp. 120928. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120928
19. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. Vol. 39. Pp. 201–225. https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5
20. Tryggvason G., Scardovelli R., Zaleski S. Direct Numerical Simulations of Gas-Liquid Multiphase Flow. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2011.
21. Xiao F., Ii S., Chen C. Revisit to the THINC scheme: A simple algebraic VOF algorithm // J. Comput. Phys. 2011. Vol. 230. Pp. 7086–7092. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.06.012

References

1. Calabro M., Overview on hybrid propulsion, *Progress in Propulsion Physics*, 2011, vol. 2, pp. 353–374. DOI: 10.1051/eucass/201102353
2. Okninski A., Kopacz W., Kaniewski D., Sobczak K., Hybrid rocket propulsion technology for space transportation revisited – propellant solutions and challenges, *Fire Phys. Chem*., 2021, vol. 1, issue 4, pp. 260–271. https://doi.org/10.1016/j.fpc.2021.11.015
3. Pastrone D., Approaches to low fuel regression rate in hybrid rocket engines, *Int. J. Aerosp. Eng*., 2012, vol. 2012, Article ID 649753, pp. 1–12. DOI:10.1155/2012/649753
4. Mazzetti A., Merotto L., Pinarello G., Paraffin-based hybrid rocket engines applications: A review and a market perspective, *Acta Astronaut*., 2016, vol. 126, pp. 286–297. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.036
5. Wada Y., Kawabata Y., Kato R., Kato N., Hori K., Observation of combustion behavior of low melting temperature fuel for a hybrid rocket using double slab motor, *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2016, vol. 15, issue 5, pp. 351–369. DOI: 10.1615/IntJEnergeticMarerialsChemProp.2017011278
6. Liu X., Hu S., Wang Y., Zhang W., Liu L., Droplet entrainment characteristics of HTPB/Paraffin blended fuels for hybrid rocket motors, *Acta Astronaut*., 2024, vol. 214, pp. 293–302. DOI:10.1016/j.actaastro.2023.10.043
7. Petrarolo A., Kobald M., Schlechtriem S., Optical analysis of the liquid layer combustion of paraffin-based hybrid rocket fuels, *Acta Astronaut*., 2019, vol. 158, pp. 313–322. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.05.059
8. Zarko V., Kiskin A., Cheremisin A., Contemporary methods to measure regression rate of energetic materials: A review, *Prog. Energy Combust. Sci*., 2022, vol. 91, pp. 100980. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100980
9. Kiskin A. B., Zarko V. E., Eremin I. V., Studying the paraffin based mixtures regression under high speed hot air blowing, *Acta Astronaut*., 2024, vol. 216, pp. 330–335. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2024.01.005

10. Usanov V. A., Gembarzhevskii G. V., Rashkovskiy S. A., Yakush S. E., Melting and regression of paraffin samples in hot air flow, *Heat Transfer Research*., 2025, vol. 56, issue 1, pp. 27–44. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2024056249
11. Sivakov N. S., Usanov V. A., Numerical and Experimental Study of Paraffin Melting in a Heated Air Flow, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, issue 7 [in Russian]. http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-7/articles/1137/
12. Betelin V. B., Kushnirenko A. G., Smirnov N. N., Nikitin V. F., Tyurenkova V. V., Stamov L. I., Numerical investigations of hybrid rocket engines, *Acta Astronaut*., 2018, vol. 144, pp. 363–370. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.01.009
13. Kushnirenko A. G., Stamov L. I., Tyurenkova V. V., Smirnova M. N., Mikhalchenko E. V., Three-dimensional numerical modeling of a rocket engine with solid fuel, *Acta Astronaut*., 2021, vol. 181, pp. 544–551. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.028
14. Rashkovskiy S. A., Yakush S. E., Baranov A. A., Modeling of a solid-fuel ramjet engine with a combustion stabilizer, *Combustion and explosion*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 79–84 [in Russian].
15. Rashkovskiy S. A., Yakush S. E., Numerical simulation of low-melting temperature solid fuel regression in hybrid rocket engines, *Acta Astronaut*., 2020, vol. 176, pp. 710–716. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.002
16. Yakush S. E., Rashkovskiy S. A., Modeling of liquefying material interaction with hot gas flow in application to hybrid rocket engines, *AIP Conference Proceedings*, 2021, vol. 2351, No. 1, P. 030069. DOI: 10.1063/5.0052253
17. Migliorino M. T., Fabiani M., Paravan C., Bianchi D., Nasuti F., Galfetti L., Pellegrini R. C., Cavallini E., Numerical and experimental analysis of fuel regression rate in a lab-scale hybrid rocket engine with swirl injection, *Aerosp. Sci. Technol*., 2023, vol. 140, pp. 108467. https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108467
18. Carmicino C., Gallo G., Savino R., Self-consistent surface-temperature boundary condition for liquefying-fuel-based hybrid rockets internal-ballistics simulation, *Int. J. Heat Mass Transf*., 2021, vol. 169, pp. 120928. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120928
19. Hirt C. W., Nichols B. D., Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys*., 1981, vol. 39, pp. 201–225. https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5
20. Tryggvason G., Scardovelli R., Zaleski S., *Direct Numerical Simulations of Gas-Liquid Multiphase Flow*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2011.
21. Xiao F., Ii S., Chen C., Revisit to the THINC scheme: A simple algebraic VOF algorithm, *J. Comput. Phys*., 2011, vol. 230, pp. 7086–7092. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.06.012

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2025 г.