

УДК 544.452.2

## УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ В КАНАЛЕ: ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ КАНАЛА И ШЕРОХОВАТОСТИ СТЕНОК

А. В. Ярков, А. Д. Киверин, И. С. Яковенко

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, yarkov.andrey.v@gmail.com

Представлены результаты численного моделирования процесса ускорения пламени в полуоткрытом канале, заполненном смесями на основе ацетилена. Расчеты проведены с использованием современного бездиссипативного метода КАБАРЕ. На основе сопоставления результатов, полученных в разных постановках, продемонстрировано влияние ширины канала и степени шероховатости его внутренней поверхности на динамику развития пламени на различных стадиях процесса ускорения пламени. В частности, показано, что при увеличении ширины канала увеличиваются скорость распространения пламени и амплитуда пульсаций скорости на квазистационарной стадии распространения пламени. Также показано, что торможение потока у стенок канала оказывает наиболее существенное влияние на стадии квазистационарного распространения пламени ввиду более стремительного развития пограничного слоя и генерации вихрей в пристеночной области и их взаимодействия с вытянутым вдоль стенок канала пламенем.

Ключевые слова: нестационарное горение, ускорение пламени в канале, горение ацетилена, численное моделирование, влияние геометрии канала.

DOI 10.15372/FGV2022.9291

### ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие энергетики и транспорта сопряжено с повышением требований к энергоэффективности и экологичности энергетических установок и двигательных систем. В связи с этим в настоящее время ведутся активные исследования, направленные на повышение энергоэффективности технических устройств [1] и снижение загрязняющих окружающую среду выбросов [2], в том числе при использовании альтернативных топлив [3, 4]. При этом особое внимание уделяется перспективам использования газообразных углеводородных топлив. Они находят широкое применение во многих сферах энергетической отрасли. В последнее время газообразные углеводороды активно используют в качестве добавки к основному топливу [5, 6], что не только повышает эффективность работы двигателя, но и способствует снижению выбросов оксидов азота и углерода. Этим современное применение газообразных топлив не ограничивается. Они хорошо себя зарекомендовали и как самостоятельное горючее для двигателей, в том числе для двигателей внутреннего сгорания [7, 8]. Еще од-

ним перспективным направлением использования горючих газовых смесей является разработка импульсных и вращающихся детонационных двигателей [9, 10], в которых они могут выступать в качестве основного вида топлива. В частности, одним из наиболее ярких кандидатов в качестве топлива для детонационных двигателей является ацетилен ввиду его высокой химической активности и широких детонационных пределов [11–13]. С другой стороны, ацетилен можно рассматривать как добавку к другим углеводородным топливам, повышающую химическую активность и, как следствие, устойчивость процесса горения в широком диапазоне составов и термодинамических параметров [14], что является ключевым шагом к организации эффективных режимов горения газообразных топлив и снижению сопутствующих вредных выбросов.

Использование газообразного топлива на основе ацетилена сопряжено с возможностью развития детонационных режимов горения, в том числе способных привести к аварийным ситуациям [15], в связи с чем возникает необходимость углубленного изучения как критериев перехода в детонацию, так и самих механизмов, ответственных за развитие нестационарного горения газообразных смесей на основе ацетилена. Этому вопросу посвящены экспериментальные [16–19] и расчетно-теоретические

Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН (МСЦ РАН).

© Ярков А. В., Киверин А. Д., Яковенко И. С., 2023.

работы [20]. В работах [21, 22] приводится описание заключительной стадии развития процесса горения, предшествующей переходу к детонации. Следует, однако, учитывать, что на развитие ускорения пламени большое влияние могут оказывать размер канала [23, 24], в котором распространяется пламя реагирующей смеси, и структура его внутренней поверхности [25–27]. С другой стороны, как отмечается в экспериментальной работе [28], на динамику пламени существенно влияет развитие пограничного слоя в потоке перед фронтом пламени. В связи с этим при исследовании механизмов перехода горения в детонацию отдельное внимание необходимо уделить перечисленным факторам как в случае интерпретации экспериментальных данных, так и при постановке задач численного моделирования. В последнем случае влияние геометрии канала и граничных условий, моделирующих топологию стенок канала, на распространение пламени зачастую не рассматривается подробно, что может быть причиной как рассогласования экспериментальных и расчетных данных, так и некорректной интерпретации результатов моделирования. В связи с этим в настоящей работе рассмотрено влияние ширины канала и торможения потока на стенках канала на процесс нестационарного развития пламени в смесях на основе ацетилена.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### 1.1. Математическая модель и численный метод

Исследование проводилось методом численного моделирования процесса распространения пламени в канале. Газодинамика описывалась с использованием полной системы уравнений Навье — Стокса с учетом теплопроводности, вязкости, многокомпонентной диффузии и химических превращений в зоне горения. Для проведения численных расчетов был использован авторский вычислительный пакет NRG с открытым исходным кодом [29], на базе которого был реализован бездиссипативный метод КАБАРЕ решения уравнений газовой динамики [30], ранее всесторонне протестированный и показавший высокий потенциал для решения задач физики горения и детонации [31–33]. Отметим, что выбор схемы КАБАРЕ, в частности, был связан с рядом преимуществ этой вычислительной методики

для расчета нестационарных реагирующих течений, таких как низкая схемная вязкость, минимальная аппроксимационная дисперсия, второй порядок точности. В ходе решения уравнений газовой динамики использовались табличные уравнения состояния смеси, в том числе учитывались зависимости удельной теплоемкости и энтропии образования от температуры и состава смеси. Процесс химического превращения компонентов моделировался путем решения жесткой системы обыкновенных дифференциальных уравнений химической кинетики с применением метода Гира [34]. Полиномиальные аппроксимации теплофизических параметров рассчитывались из таблиц формата NIST-JANAF [35] с коэффициентами, предлагаемыми авторами соответствующих кинетических механизмов. Расчет коэффициентов переноса проводился с использованием данных [36], прилагаемых к кинетическим механизмам. Размер расчетной ячейки выбран равным 50 мкм, что соответствует области сходимости решения и обеспечивает адекватное воспроизведение особенностей газодинамики горения рассматриваемых газовых смесей [37].

### 1.2. Описание методики исследования

Вычисления проводились в двумерной постановке, в рамках которой расчетная область представляла собой полуоткрытый канал заданной ширины  $H$ , заполненный реагирующей 75%-й стехиометрической смесью ацетилена с кислородом, разбавленной 25 % азота, или стехиометрической смесью ацетилена с воздухом. Горение инициировалось источником малого радиуса ( $r = 1$  мм), внутри которого горючая смесь была мгновенно изобарически нагрета до температуры 1 500 К, остальная же область находилась при температуре 300 К. На стенках реактора ставились условия прилипания, при этом стенка считалась изотермичной с температурой 300 К. Ввиду осевой симметрии была рассмотрена лишь одна половина канала, оставшаяся же часть учитывалась путем введения граничных условий симметрии на нижней границе расчетной области. Схематическое изображение расчетной области приведено на рис. 1.

В качестве механизма химической кинетики выбрана редуцированная кинетическая схема, включающая в себя 25 реакций и 17 компонентов [38]. Важно отметить, что выбор кинетического механизма играет ключевую роль

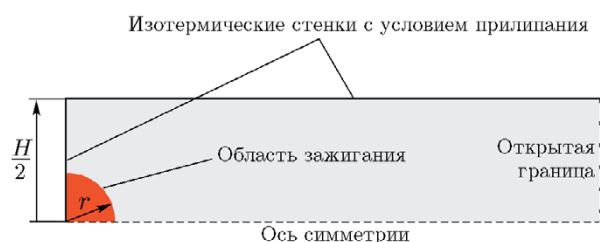


Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области

при моделировании процессов нестационарного ускорения пламени и перехода к детонации [39]. Ранее в работе [37] авторами был проведен всесторонний анализ современных кинетических механизмов окисления ацетилена, который показал, что редуцированный механизм [38], наряду с более полными механизмами химической кинетики [40, 41], обеспечивает качественное воспроизведение изменения скорости горения с давлением и температурой, полученного в эксперименте [42], что принципиально для адекватного описания процессов ускорения пламени и перехода к детонации. При этом использование детальных механизмов позволяет достичь более точного количественного совпадения параметров горения, однако требует существенного увеличения используемых вычислительных ресурсов по сравнению с редуцированными схемами.

С целью исследования влияния размеров канала на динамику фронта горения были рассмотрены каналы разной ширины: узкий ( $H = 5$  мм), средний ( $H = 10$  мм) и широкий ( $H = 20$  мм), заполненные стехиометрической смесью ацетилена с кислородом, смешанной с азотом до степени разбавления 25 %. Начальное давление смеси 20 кПа. Такой состав и условия задавались с ориентиром на недавние эксперименты, направленные на изучение особенностей процесса ускорения пламени и перехода в детонацию [17–19]. Длина канала составляла  $L = 25H$ , так как, исходя из данных экспериментов, все характерные особенности и стадии ускорения пламени в рассматриваемой смеси можно наблюдать в трубах длиной не менее 25 калибров. Используемая смесь обладает достаточно хорошей реакционной способностью, необходимой для наблюдения значительных отличий в динамике пламени на рассматриваемых пространственных масштабах.

Влияние топологии внутренней поверхности канала исследовалось на примере стехио-

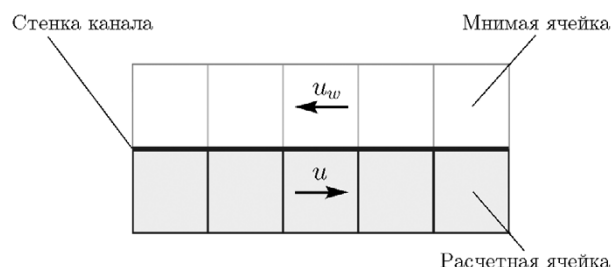


Рис. 2. Схематическое изображение границы расчетной области

метрической ацетиленовоздушной смеси. Степень шероховатости учитывалась путем введения поправочного коэффициента, выражающего интенсивность торможения потока вблизи стенок:

$$u_w = -ku, \quad (1)$$

где  $u$  — тангенциальная скорость потока вблизи стенки канала,  $u_w$  — тангенциальная скорость в соответствующей мнимой ячейке,  $k$  — поправочный коэффициент. Схематическое изображение границы расчетной области представлено на рис. 2. В рамках предложенного модельного подхода значение поправочного коэффициента не привязывалось к реальной топологии внутренней поверхности канала ввиду того, что для этого необходимы дополнительные экспериментальные и расчетные данные. Поэтому представленные ниже результаты следует использовать исключительно для качественного анализа. Тем не менее такая визуализация эффекта на качественном уровне указывает на целесообразность дальнейшего развития предложенной модели для количественного воспроизведения топологии внутренней поверхности канала.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Влияние ширины канала

На рис. 3 представлены мгновенные изображения пламени разбавленной азотом ацетиленокислородной смеси в последовательные моменты времени в канале шириной 20 мм. Этот пример позволяет рассмотреть все стадии эволюции структуры фронта. В недавних работах [43, 44] методами численного моделирования и экспериментально было показано, что ускорение пламени на начальной стадии является автомодельным и для его описания в каналах различной ширины удобно использовать безразмерные переменные  $\xi = x_f/H$  и  $\eta = tS_L/H$ , где

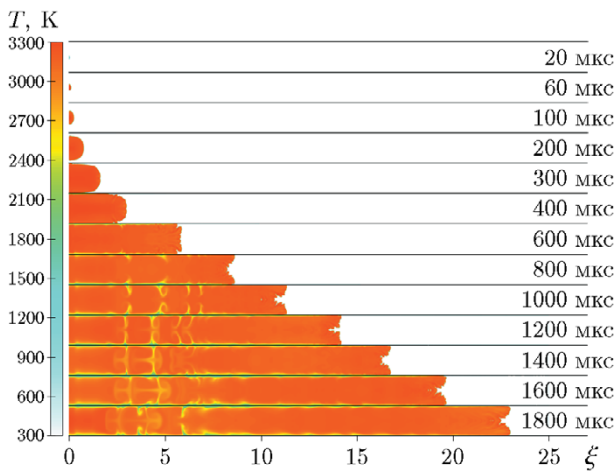


Рис. 3. Эволюция пламени смеси ацетилен — кислород (стехиометрия), разбавленной азотом ( $X_{N_2} = 0.25$ ), в широком канале ( $H = 20$  мм):

справа — соответствующие профилям моменты времени

$x_f$  — координата фронта,  $t$  — время,  $S_l$  — нормальная скорость горения газовой смеси. Эти автомодельные переменные использованы и в настоящей работе для обобщения результатов, получаемых в каналах различной ширины.

После инициирования горения точечным источником формируется фронт пламени, изотропно расширяющийся (20 ÷ 100 мкс на рис. 3) со скоростью  $U_{f,l}$ , определяемой как произведение нормальной скорости ламинарного пламени ( $S_l = 8.6$  м/с) на коэффициент расширения  $\theta = \rho_u / \rho_b \approx 10.5$ , где  $\rho_u$  и  $\rho_b$  — плотность свежей смеси и продуктов горения соответственно. Отметим, что экспериментальное значение  $U_{f,l}$  на этой стадии составляет 78 м/с [19], тогда как расчет дает значение 90 м/с, таким образом, выбранная в настоящей работе модель, включая в первую очередь модель химической кинетики, воспроизводит начальную стадию развития процесса с погрешностью, не превышающей 16 %.

Далее происходит торможение боковой поверхности фронта пламени в результате воздействия возвратных течений от боковых стенок канала (100 ÷ 200 мкс на рис. 3). Фронт начинает вытягиваться вдоль стенок, а скорость распространения наиболее выступающей (или ведущей) точки фронта пламени  $U_{f,l}$  начинает увеличиваться со временем. Профиль скорости потока перед фронтом пламени имеет характерную U-образную форму с максимумом

скорости в ядре потока и торможением потока на стенках канала за счет вязкого трения. На описанной стадии процесса наблюдается начало экспоненциального роста скорости ведущей точки [21], обусловленного положительной обратной связью между растяжением пламени в потоке, неоднородном по сечению канала, и соответствующим увеличением интегральной скорости горения. Фронт пламени приобретает характерную пальцеобразную структуру, вытянутую вдоль стенок канала (200 ÷ 400 мкс на рис. 3). Дальнейшая динамика пламени определяется сочетанием двух факторов: влиянием волны разрежения, формируемой в области продуктов горения по мере удаления фронта от заднего закрытого торца канала, и взаимодействием пламени с пограничным слоем вблизи боковых стенок. По мере распространения пламени и увеличения расстояния между фронтом пламени и закрытым торцом канала распределение давления в области продуктов горения перестает быть однородным и в зоне продуктов горения формируются волны сжатия и волны разрежения, взаимодействующие с фронтом пламени (рис. 4). Волны сжатия, взаимодействуя с фронтом горения, способствуют локальному ускорению пламени и развитию неустойчивости на его поверхности. Волны разрежения, в свою очередь, замедляют фронт пламени. В результате происходит перестройка структуры фронта. В центральной части канала наблюдается торможение фронта, при этом конфигурация фронта становится почти плоской вдоль сечения канала. На его поверхности развивается неустойчивость,

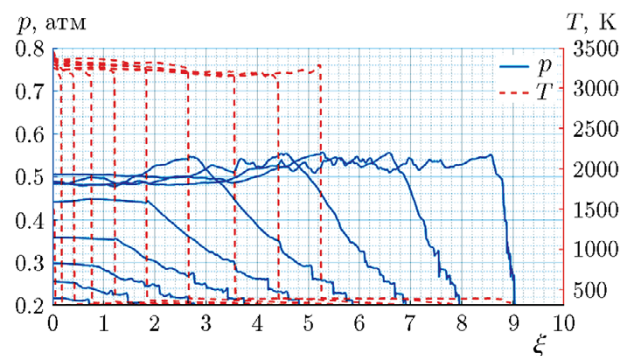


Рис. 4. Профили давления (сплошные линии) и температуры (штриховые линии) вдоль оси канала с временным интервалом 60 мкс. Смесь ацетилен — кислород (стехиометрия), разбавленная азотом ( $X_{N_2} = 0.25$ ), в канале шириной  $H = 20$  мм

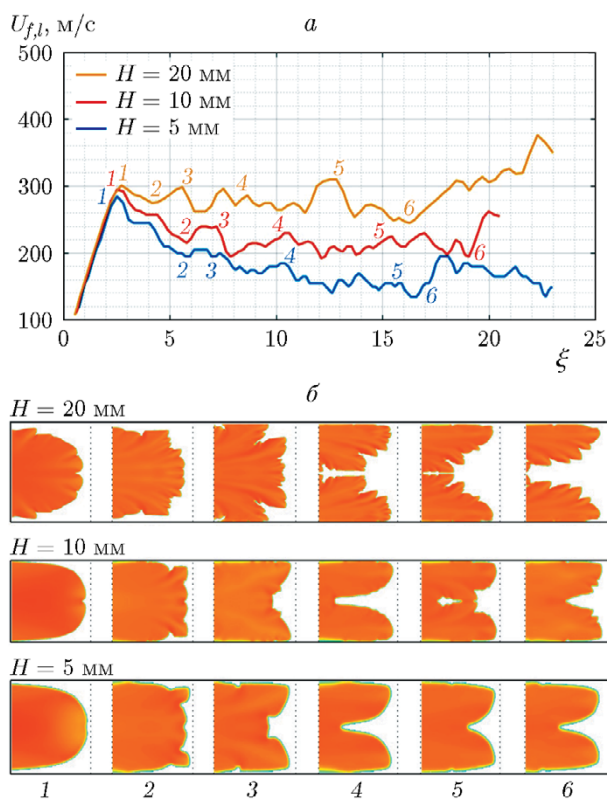


Рис. 5. Скорость фронта пламени смеси ацетилен — кислород (стехиометрия), разбавленной азотом ( $X_{N_2} = 0.25$ ), в зависимости от автомодельной переменной (а) и профили фронта пламени (б)

а влияние неоднородности потока перед фронтом пламени способствует формированию вытянутой вдоль стенок структуры фронта или так называемого тюльпанообразного пламени. Далее пламя некоторое время распространяется в квазистационарном режиме, характеризующемся сменяющимися друг друга процессами схлопывания и образования пристеночных языков пламени.

На рис. 5,а приведены хронограммы скорости горения в каналах различной ширины и отмечены точки, соответствующие характерным стадиям развития поверхности фронта пламени. На рис. 5,б показаны пространственные структуры фронта пламени на различных стадиях эволюции процесса: 1 — конец стадии экспоненциального роста, 2 — формирование плоского фронта, 3 — торможение ядра потока, 4 — формирование тюльпанообразного пламени, 5 — схлопывание языков пламени, 6 — повторное вытягивание языков пламени. Видно, что увеличение ширины канала способ-

ствует, во-первых, повышению средней скорости фронта, во-вторых, увеличению пульсаций скорости на стадии тюльпанообразного пламени. При этом определенной структуре фронта соответствует смена характера изменения скорости его распространения. Так, экспоненциальная стадия роста скорости заканчивается в момент перестройки вытянутой пальцеобразной структуры в промежуточную конфигурацию плоского пламени и существенного торможения волны горения. Далее эволюция плоского фронта сопровождается возмущением поверхности фронта и положительным скачком скорости его распространения, а фазам торможения фронта соответствуют моменты его взаимодействия с волнами разрежения. Последующее образование тюльпанообразного пламени способствует установлению квазистационарного режима распространения, где схлопывание языков тюльпанообразного пламени приводит к заметному снижению скорости и переходу к плоской конфигурации пламени, а повторное вытягивание языков пламени приводит к возобновлению роста скорости.

Влияние ширины канала на среднее значение скорости и интенсивности ее пульсаций можно объяснить тем, что на этом этапе происходит переход от тюльпанообразной структуры к плоскому пламени и обратно. Смена топологии фронта пламени сопровождается изменением площади его поверхности, и чем больше это изменение, тем более существенно изменяется скорость фронта. В свою очередь, средняя скорость фронта пламени напрямую зависит от средней величины площади поверхности фронта. Наибольшую площадь поверхности фронт имеет в случае широкого канала, чему способствуют, с одной стороны, большие пространственные масштабы для растяжения пламени в потоке и, с другой, возможность развития коротковолновых возмущений фронта. В случае же узкого канала языки пламени в пристеночной области разделяет лишь небольшая область свежей смеси и, как результат, колебания скорости на стадии тюльпанообразного пламени заметно слабее по сравнению с каналами большей ширины.

После установления квазистационарного режима распространения фронта пламени и формирования тюльпанообразной структуры важную роль начинают играть особенности развития пограничного слоя. На рис. 6,а представлены изображения полей завихренности



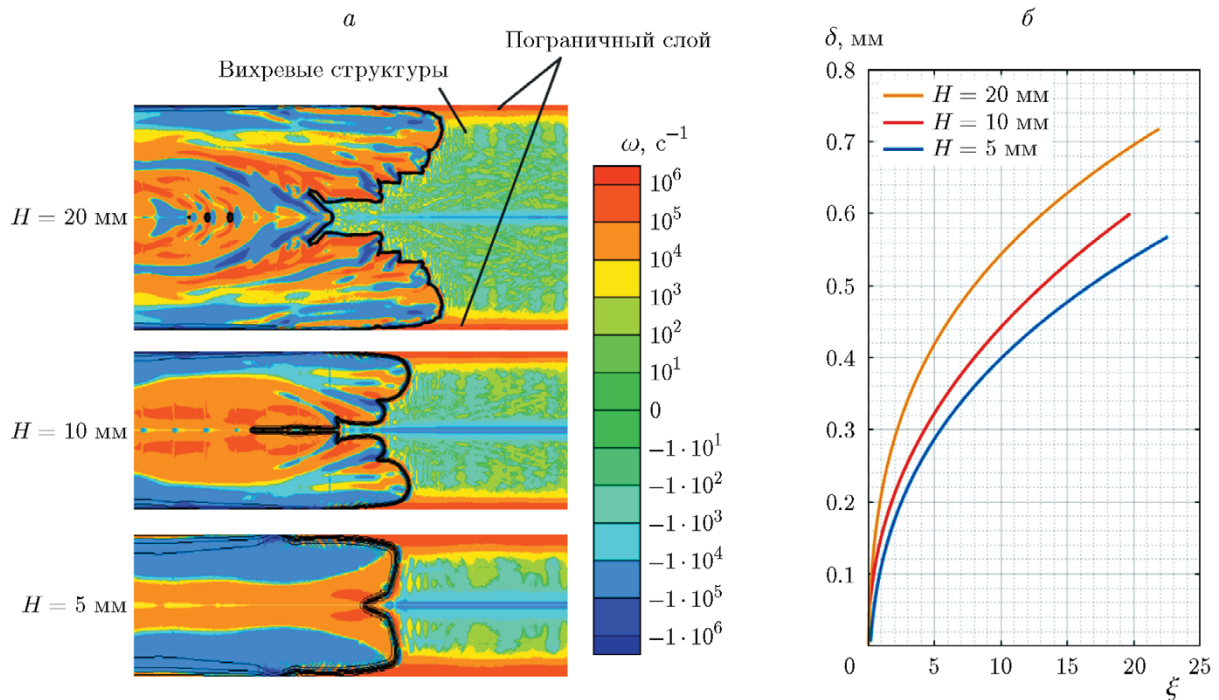


Рис. 6. Поле завихренности потока на заключительной стадии эволюции пламени смеси ацетилен — кислород (стехиометрия), разбавленной азотом ( $X_{N_2} = 0.25$ ), в каналах различных диаметров (а) и оценка ширины пограничного слоя перед фронтом пламени (б):

а — картины пламени в каналах меньшего размера приведены в увеличенном масштабе, черная линия — положение фронта пламени, определяемое по значению температуры 1000 К

потока  $\omega = \frac{dv_y}{dx} - \frac{dv_x}{dy}$ , где  $v_x$  и  $v_y$  — пространственные компоненты вектора массовой скорости потока. Анализ ширины пограничного слоя (рис. 6, б) позволяет заключить, что с увеличением ширины канала увеличивается инкремент роста эффективной ширины пограничного слоя вблизи стенок канала в потоке перед фронтом пламени. Оценка ширины пограничного слоя перед фронтом пламени проводилась путем вычисления для каждого момента времени поперечного размера пристеночной зоны, внутри которой модуль величины завихренности превышает критическое значение  $\omega_{cr} = 50\,000 \text{ с}^{-1}$  (приближенное к минимальному значению завихренности внутри пограничного слоя, см. рис. 6, а). Полученные оценочные значения аппроксимировались степенной функцией вида  $y = ax^n + b$ . С увеличением ширины пограничного слоя становится возможным переход от ламинарного режима к развитию неустойчивости пограничного слоя и формированию вихреобразных течений. Наличие вихревых структур вблизи стенок канала способствует интенсификации горения в этих

областях, что в конечном итоге приводит к выходу процесса из квазистационарного режима, последующему ускорению пламени и переходу к детонации [15].

## 2.2. Влияние шероховатости стенок канала

На рис. 7 представлены временные зависимости скорости фронта пламени в стехиомет-

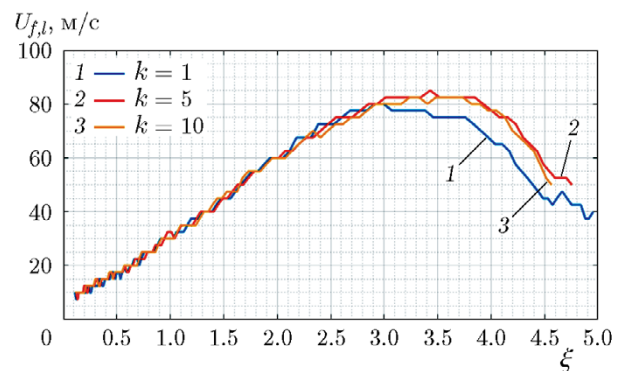


Рис. 7. Скорость фронта пламени ацетилено-воздушной смеси в зависимости от автомобильной переменной при различных коэффициентах шероховатости стенок

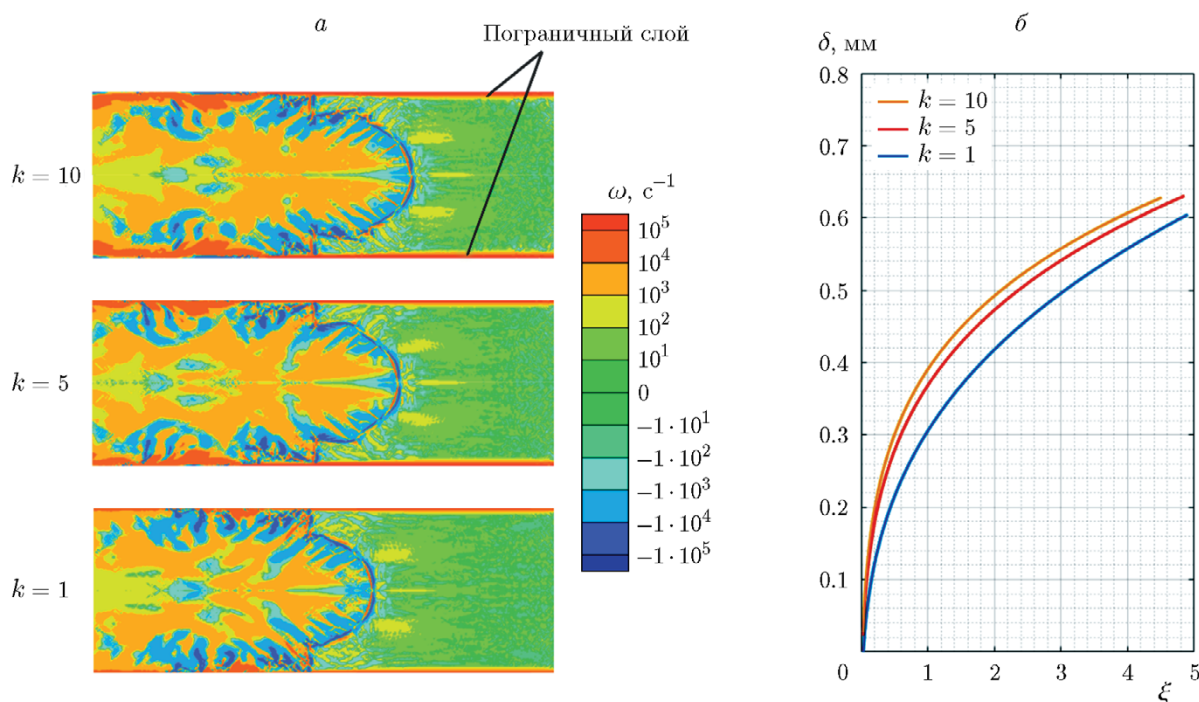


Рис. 8. Поле завихренности потока на заключительной стадии эволюции пламени ацетиленовоздушной смеси при различных коэффициентах шероховатости стенок ( $a$ ,  $t = 2\,200$  мкс) и оценка ширины пограничного слоя ( $b$ )

рической ацетиленовоздушной смеси при различных значениях поправочного коэффициента  $k$ , моделирующего эффект торможения потока за счет шероховатости внутренней поверхности канала. Видно, что топология внутренней поверхности канала оказывает заметное влияние на динамику пламени на стадии его квазистационарного распространения. В случае более интенсивного торможения потока у стенок обеспечивается, с одной стороны, усиление нагрева свежей смеси в результате диссипации кинетической энергии потока в тепловую за счет вязкого трения и, с другой, большая неоднородность скорости течения в поперечном сечении канала. Как видно из рис. 8,  $a$ , большая шероховатость стенок ( $k = 5, 10$ ) ведет к генерации более интенсивных вихревых течений вблизи стенки перед и за фронтом, что усиливает тепло- и массообмен между зоной энерговыделения и свежей смесью и способствует интенсификации горения. Кроме того, с увеличением шероховатости растет темп развития пограничного слоя (см. рис. 8,  $b$ ). Данные факторы способствуют ускорению пламени вблизи стенок канала и тем самым препятствуют перестройке тьюлпанообразного фронта горения к плоской топо-

логии фронта и сопутствующему торможению волны горения. Оценка ширины пограничного слоя перед фронтом пламени проводилась методом, описанным в § 2.1. За пороговое значение модуля завихренности была взята величина  $\omega_{cr} = 5\,000$  с<sup>-1</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы проведено численное моделирование процесса горения пламени в смесях на основе ацетилена для оценки влияния особенностей геометрии канала и топологии его стенок на динамику ускорения пламени.

На примере стехиометрической смеси ацетилена с кислородом, смешанной с азотом до степени разбавления 25 %, продемонстрирована зависимость характера эволюции структуры фронта пламени от ширины канала. В частности, показано, что при увеличении ширины канала наблюдаются рост скорости распространения фронта и повышение амплитуды ее колебаний на стадии квазистационарного распространения пламени. Это является прямым следствием зависимости площади поверхности фронта пламени от ширины канала и ее изме-

нения в ходе эволюции структуры пламени, в том числе за счет развития гидродинамической неустойчивости фронта. В случае канала малой ширины языки пламени тюльпанообразной структуры находятся на небольшом расстоянии друг от друга, что приводит к их слиянию в результате сгорания смеси в образовавшемся узком зазоре и, как результат, к переходу к практически стационарному режиму распространения пламени.

Показано существенное влияние на процесс горения модели торможения потока у стенок канала, имитирующей влияние топологии внутренней поверхности стенок канала. Интенсификация торможения потока вследствие увеличения шероховатости стенок канала оказывает непосредственное влияние на характеристики пограничного слоя. Оценка его ширины для рассмотренных случаев показала, что в широких каналах на заданный момент времени формируется наиболее развитый пограничный слой. В этом случае неустойчивость пограничного слоя ведет к генерации вихревых течений перед фронтом пламени, способствующих, с одной стороны, интенсификации тепло- и массообмена между зоной энерговыделения и свежей смесью, а с другой, возмущению поверхности фронта, в результате чего заметно увеличивается его площадь. При этом шероховатость стенок ускоряет развитие пограничного слоя, тем самым способствуя развитию поверхности фронта пламени, в особенности на стадии квазистационарного распространения пламени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cooney C. P., Yeliana, Worm J. J., Naber J. D. Combustion characterization in an internal combustion engine with ethanol — Gasoline blended fuels varying compression ratios and ignition timing // *Energy Fuels*. — 2009. — V. 25, N 5. — P. 2319–2324. — DOI: 10.1021/ef800899r.
2. Li L., Wang J., Wang Z., Liu H. Combustion and emissions of compression ignition in a direct injection diesel engine fueled with pentanol // *Energy*. — 2015. — V. 80. — P. 575–581. — DOI: 10.1016/j.energy.2014.12.013.
3. Abedin M. J., Masjuki H. H., Kalam M. A., Sanjid A., Asharfur Rahman S. M., Masum B. M. Energy balance of internal combustion engines using alternative fuels // *Renew. Sustain. Energy Rev.* — 2013. — V. 26. — P. 20–33. — DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.049.
4. Fayad M. A. Effect of renewable fuel and injection strategies on combustion characteristics and gaseous emissions in diesel engines // *Energy Sources, Pt A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. — 2022. — V. 42, N 4. — P. 460–470. — DOI: 10.1080/15567036.2019.1587091.
5. Mustafi N. N., Raine R. R., Verhelst S. Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels // *Fuel*. — 2013. — V. 109. — P. 669–678. — DOI: 10.1016/j.fuel.2013.03.007.
6. Ji Ch., Wang Sh., Zhang B. Performance of a hybrid hydrogen–gasoline engine under various operating conditions // *Appl. Energy*. — 2012. — V. 97. — P. 584–589. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.11.056.
7. Haller J., Link T. Thermodynamic concept for an efficient zero-emission combustion of hydrogen and oxygen in stationary internal combustion engines with high power density // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2017. — V. 42, N 44. — P. 27374–27387. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.168.
8. Ilbas M., Yilmaz I., Kaplan Y. Investigations of hydrogen and hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and NO<sub>x</sub> emission characteristics in a model combustor // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2005. — V. 30, N 10. — P. 1139–1147. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2004.10.016.
9. Wolański P. Detonative propulsion // *Proc. Combust. Inst.* — 2013. — V. 34, N 1. — P. 125–158. — DOI: 10.1016/j.proci.2012.10.005.
10. Rankin B. A., Fotia M. L., Naples A. G., Stevens C. A., Hoke J. L., Kaemming T. A., Theuerkauf S. W., Schauer F. R. Overview of performance, application, and analysis of rotating detonation engine technologies // *J. Propul. Power*. — 2017. — V. 33, N 1. — P. 131–143. — DOI: 10.2514/1.B36303.
11. Smirnov N. N., Betelin V. B., Nikitin V. F., Phylippov Yu. G., Koo J. Detonation engine fed by acetylene-oxygen mixture // *Acta Astronaut.* — 2014. — V. 104, N 1. — P. 134–146. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2014.07.019.
12. Mikhachenko E. V., Nikitin V. F. Rotating detonation engine fed by acetylene-oxygen combustible mixture modeling // *AIP Conf. Proc.* — 2020. — V. 2304. — 020022. — DOI: 10.1063/5.0034711.
13. Zhou S. B., Ma H., Chen S., Zhong Y., Zhou C. S. Experimental investigation on propagation characteristics of rotating detonation wave with a hydrogen-ethylene-acetylene fuel // *Acta Astronaut.* — 2019. — V. 157. — P. 310–320. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.009.
14. Lakshmanan T., Nagarajan G. Experimental investigation of port injection of acetylene in DI diesel engine in dual fuel mode // *Fuel*. — 2011. — V. 90, N 8. — P. 2571–2577. — DOI: 10.1016/j.fuel.2011.03.039.
15. Nikitin V. F., Mikhachenko E. V. Safety of a rotating detonation engine fed by acetylene-oxygen mixture launching stage // *Acta Astronaut.* — 2022. — V. 194. — P. 496–503. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.11.035.



16. **Wu Y., Zheng Q., Weng Ch.** An experimental study on the detonation transmission behaviours in acetylene-oxygen-argon mixtures // *Energy*. — 2018. — V. 143. — P. 554–561. — DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.019.
17. **Krivosheyev P., Penyazkov O.** Analysis of the final stage of flame acceleration and the onset of detonation in a cylindrical tube using high-speed stereoscopic imaging // *Combust. Flame*. — 2020. — V. 216. — P. 146–160. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.02.027.
18. **Кривошеев П. Н., Новицкий А. О., Пенязьков О. Г.** Эволюция структуры и формы фронта реакции при ускорении пламени и переходе горения в детонацию // *Хим. физика*. — 2022. — Т. 41, № 8. — С. 38–47. — DOI: 10.31857/S0207401X22080076.
19. **Krivosheyev P., Novitski A., Penyazkov O.** Flame front dynamics, shape and structure on acceleration and deflagration-to-detonation transition // *Acta Astronaut.* — 2023. — V. 204. — P. 692–704. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.10.016.
20. **Oran E. S., Gamezo V. N.** Origins of the deflagration-to-detonation transition in gas-phase combustion // *Combust. Flame*. — 2007. — V. 148, N 1-2. — P. 4–47. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2006.07.010.
21. **Liberman M. A., Ivanov M. F., Kiverin A. D., Kuznetsov M. S., Chukalovsky A. A., Rakhimova T. V.** Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures // *Acta Astronaut.* — 2010. — V. 67, N 7-8. — P. 688–701. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.05.024.
22. **Киверин А. Д., Яковенко И. С.** Высокоскоростные режимы распространения пламени в канале и переход к детонации // *Теплофизика высоких температур*. — 2020. — Т. 58, № 4. — С. 707–716. — DOI: 10.31857/S0040364420040079.
23. **Yoshida K., Hayashi K., Morii Y., Murakami K., Tsuboi N., Hayashi A. K.** Study on behavior of methane/oxygen gas detonation near propagation limit in small diameter tube: effect of tube diameter // *Combust. Sci. Technol.* — 2016. — V. 188, N 11-12. — P. 2012–2025. — DOI: 10.1080/00102202.2016.1213989.
24. **Li J., Lai W. H., Chung K.** Tube diameter effect on deflagration-to-detonation transition of propane-oxygen mixtures // *Shock Waves*. — 2006. — V. 16, N 2. — P. 109–117. — DOI: 10.1007/s00193-006-0056-8.
25. **Kuznetsov M., Liberman M., Matsukov I.** Experimental study of the preheat zone formation and deflagration to detonation transition // *Combust. Sci. Technol.* — 2010. — V. 182, N 11-12. — P. 1628–1644. — DOI: 10.1080/00102202.2010.497327.
26. **Zhang B.** The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen-oxygen mixture // *Combust. Flame*. — 2016. — V. 169. — P. 333–339. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.05.003.
27. **Maeda Sh., Fujisawa M., Ienaga Sh., Hirahara K., Obara T.** Effect of sandpaper-like small wall roughness on deflagration-to-detonation transition in a hydrogen-oxygen mixture // *Proc. Combust. Inst.* — 2019. — V. 37, N 3. — P. 3609–3616. — DOI: 10.1016/j.proci.2018.07.119.
28. **Kuznetsov M., Alekseev V., Matsukov I., Dorofeev S.** DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-oxygen mixture // *Shock Waves*. — 2005. — V. 14. — P. 205–215. — DOI: 10.1007/s00193-005-0265-6.
29. **Numerical Reactive Gas-dynamics Software Package.** — <https://github.com/yakovenkovan/NRG>.
30. **Головизин В. М., Зайцев М. А., Карабасов С. А., Короткин И. А.** Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013.
31. **Bykov V., Kiverin A., Koksharov A., Yakovenko I.** Analysis of transient combustion with the use of contemporary CFD techniques // *Comput. Fluids*. — 2019. — V. 194. — P. 104310. — DOI: 10.1016/j.compfluid.2019.104310.
32. **Ivanov M. F., Kiverin A. D., Yakovenko I. S., Liberman M. A.** Hydrogen-oxygen flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in three-dimensional rectangular channels with no-slip walls // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2013. — V. 38, N 36. — P. 16427–16440. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.08.124.
33. **Kiverin A. D., Yakovenko I. S., Ivanov M. F.** On the structure and stability of supersonic hydrogen flames in channels // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2016. — V. 41, N 47. — P. 22465–22478. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.10.007.
34. **Хайпер Э., Ваннер Г.** Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. — М.: Мир, 1999.
35. **McBride B. J., Gordon S., Reno M. A.** Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species // *NASA Tech. Memorandum 4513*. — 1993. — <https://ntrs.nasa.gov/citations/19940013151>.
36. **Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A., Coltrin M. E., Grcar J. F., Meeks E., Moffat H. K., Lutz A. E., Dixon-Lewis G., Smooke M. D., Warnatz J., Evans G. H., Larson R. S., Mitchell R. E., Petzold L. R., Reynolds W. C., Caracotsios M., Stewart W. E., Glarborg P., Wang C., Adigun O.** CHEMKIN: a software package for the analysis of gas-phase chemical and plasma kinetic (Release 3.6). — San Diego: Reaction Des., 2000.

37. Яковенко И. С., Ярков А. В., Тюрнин А. В., Тереза А. М., Новицкий А. О., Кривошеев П. Н. Оценка возможностей современных кинетических механизмов окисления ацетилена для моделирования нестационарных процессов горения // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. — 2022. — Т. 5, № 104. — С. 62–85. — DOI: 10.18698/1812-3368-2022-5-62-85.
38. Varatharajan B. N., Williams F. A. Chemical-kinetic descriptions of high-temperature ignition and detonation of acetylene-oxygen-diluent systems // Combust. Flame. — 2001. — V. 124, N 4. — P. 624–645. — DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00235-2.
39. Dounia O., Vermorel O., Misdariis A., Poinot T. Influence of kinetics on DDT simulations // Combust. Flame. — 2019. — V. 200. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.11.009.
40. Tereza A. M., Medvedev S. P., Smirnov V. N. Experimental study and numerical simulation of chemiluminescence emission during the self-ignition of hydrocarbon fuels // Acta Astronaut. — 2019. — V. 163. — P. 18–24. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.03.001.
41. Тереза А. М., Агафонов Г. Л., Бетев А. С., Медведев С. П. Редуцирование детального кинетического механизма для эффективного моделирования задержек воспламенения смесей метана и ацетилена с кислородом // Хим. физика. — 2020. — Т. 39, № 12. — С. 29–36. — DOI: 10.31857/S0207401X20120158.
42. Rokni E., Moghaddas A., Askari O., Metghalchi H. Measurement of laminar burning speeds and investigation of flame stability of acetylene ( $C_2H_2$ )/air mixtures // J. Energy Resources Technol. — 2015. — V. 137, N 1. — 012204. — DOI: 10.1115/1.4028363.
43. Киверин А. Д., Тюрнин А. В., Яковенко И. С. Автомодельность процесса распространения пламени в канале // Хим. физика. — 2021. — Т. 40, № 12. — С. 18–22. — DOI: 10.31857/S0207401X21120098.
44. Yakovenko I., Kiverin A., Krivosheyev P., Kuzmitski V., Navitski A., Penyazkov O., Tyurnin A., Yarkov A. Burning rate estimation based on flame evolution in a channel // Acta Astronaut. — 2023. — V. 204. — P. 768–775. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.10.036.

*Поступила в редакцию 26.12.2022.*

*Принята к публикации 01.02.2023.*

---