

УДК 536.46

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ПЛАМЕНИ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ С НЕПОДВИЖНЫМ ПОРШНЕМ

**О. Ю. Семенов**

*Сургутский государственный университет, ous.tutor.phinma@mail.ru*

В статье обсуждаются условия наблюдения эффектов, проявляющихся при распространении фронта пламени в каналах, представляющих собой систему геометрических и теплофизических параметров, влияющих на горение газовой смеси в стационарных и динамических режимах. Проведено экспериментальное исследование распространения фронта газоздушного пламени в плоском канале с неподвижным поршнем. Обнаружено формирование во фронте пламени вихревых течений. Исследованы гидродинамика и структура пламени, зависящие от параметров эксперимента.

*Ключевые слова:* гидродинамическая неустойчивость, вращение пламени, циркуляция, камера сгорания, плоский поршень, ДВС, структура пламени, турбулентность.

## STUDY OF FLAME HYDRODYNAMICS IN A FLAT CHANNEL WITH A FIXED PISTON

**O. Yu. Semenov**

*Surgut State University, ous.tutor.phinma@mail.ru*

The article discusses the conditions for observing effects that manifest themselves when the flame front propagates in the channels and represents a system of geometric and thermophysical parameters affecting the combustion of a gas mixture in stationary and dynamic modes. An experimental study of the propagation of the front of an air-gas flame in a flat channel with a fixed piston is carried out. The formation of eddy currents in the flame front is detected. The hydrodynamics and flame structure depending on the parameters of the experiment are investigated.

*Keywords:* hydrodynamic instability, flame rotation, circulation, combustion chamber, flat piston, internal combustion engine, flame structure, turbulence.

Процессу горения в энергетических установках посвящено значительное количество экспериментальных и теоретических работ [1–14]. На горение газоздушных смесей в камерах сгорания влияют физико-химические параметры, при которых система возвращается к начальным условиям для продолжения процесса сгорания газовой смеси, нарушаемым при распространении фронта пламени. Полученные новые гидродинамические и теплофизические эффекты обнаруживаются в экспериментах с изученными ранее объектами. Первая причина связана с новыми возможностями современных цифровых технических средств диагностики, регистрации и обработки результатов экспериментов; вторая проявляется в совпадении и несовпадении результатов с ранее известными, полученными на одних и тех же установках с применением одинаковых инструментов и приборов. Это позволяет применить новые экспериментальные методики к изучению процессов распространения фронта пламени в камерах сгорания с поршнем [1–2].

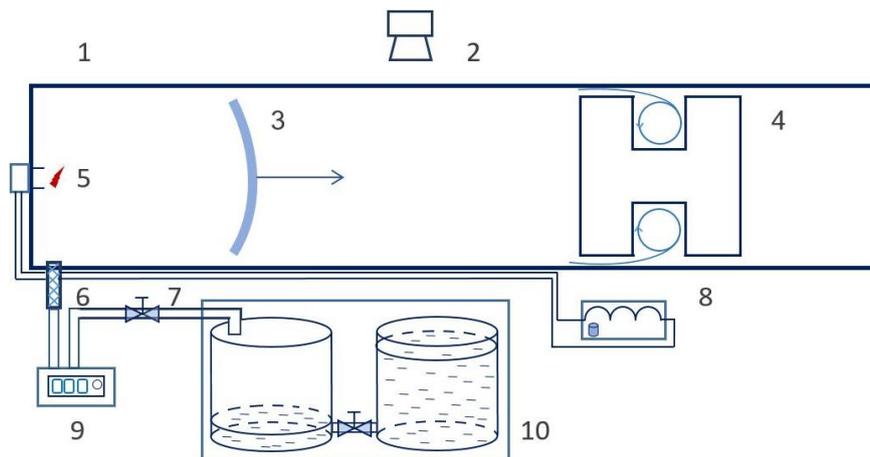
Коэффициент полезного действия современных двигателей внутреннего сгорания не превышает 50 %. Одной из причин низкого КПД является неполное сгорание топлива, связанное с закономерностями распространения фронта пламени в камере сгорания, одна из стенок которой образована поршнем. В настоящее время в научной литературе недостаточно сведений о гидродинамике течений газов и пламени около стенок поршня и поведения фронта пламени в пространстве канала-камеры сгорания, и неустойчивость процессов горения связана с процессами вихреобразования и ускорением фронта пламени.

Целью работы является исследование распространения фронта пламени в плоском прямоугольном канале с неподвижным поршнем. Объектом исследований являлся фронт пламени, распространяющийся по газовой горючей смеси в прямоугольном канале.

Фронт пламени представляет собой волну химической реакции, образующую поверхность раздела определенной ширины между начальной горючей смесью и продуктами ее сгорания. Авторами работ [3, 4] показано, что рост возмущений на поверхности фронта зависит от амплитуды, связанной с длиной волны, и степени расширения компоненты горючей смеси. Несовпадения между определенными экспериментальными фактами и эффектом Ландау, теоретически предсказывающим гидродинамическую неустойчивость фронта пламени, полностью не определены. Гидродинамическая неустойчивость Ландау – Дарье представляет собой увеличение возмущений фронта из-за возникновения областей повышенных давлений, вызванных изменениями плотностей вдоль поверхности фронта пламени; а неустойчивость Релея – Тейлора представляет собой ускорение, направленное по нормали к неоднородности пламени. Фронт пламени, имеющий волновую природу, активно воздействует на гидродинамику течения и представляет собой поверхность гидродинамического разрыва, так как он обладает тепловой и химической структурой. Учитывая указанные выше обстоятельства, можно моделировать неожиданные физические эффекты, сопровождающие взаимодействие фронта пламени со стенками канала и преградой в канале – неподвижным поршнем. Волновая природа фронта пламени может быть выявлена и изучена при определенных размерах и формах камеры сгорания, физико-химических свойствах горючей газовой смеси [5–7]. Изучению распространения фронта пламени в камерах сгорания с перегородками посвящено значительное количество работ, в которых исследуется влияние преград на развитие вихревых и турбулентных течений, определяются условия проникновения пламени в зазоры между препятствием и стенками каналов, сопровождаемые возникновением турбулентности [8–14]. В данной работе было учтено влияние на результат эксперимента одновременного сочетания разных физических параметров, определяющих многообразие воздействий на исследуемый процесс.

Схема установки для проведения экспериментов показана на рис. 1. Камера сгорания – плоский канал (рис.1. 1) – представляет собой две параллельные пластины, выполненные из прозрачного плексигласа, находящиеся на расстоянии  $3 \cdot 10^{-3}$  м друг от друга. В канале устанавливали поршень (рис.1. 4) в виде плоского прямоугольника с вырезами в форме буквы «Н». Данная форма поршня с вырезами была выбрана для уменьшения его массы, что способствовало увеличению присоединенной массы продуктов горения и дало возможность получить детальную информацию о структуре течения продуктов горения в «газовом кармане», образованном прямоугольными вырезами в поршне. Размеры поршня равнялись  $1,5 \cdot 10^{-1} \times 1,5 \cdot 10^{-1}$  м. Вырезы в поршнях имели квадратную форму со стороной  $5 \cdot 10^{-2}$  м. Расстояние между стенками канала-камеры сгорания и поршнем в разных экспериментах составляло  $3 \cdot 10^{-3}$  м ÷  $4 \cdot 10^{-3}$  м. Поршень в канале устанавливали на различных расстояниях от точки зажигания:  $5 \cdot 10^{-2}$  м,  $7,5 \cdot 10^{-2}$  м и 0,1 м – и закрепляли в неподвижном состоянии.

В экспериментах применялись пропано-воздушные смеси,готавливаемые в газометре вытеснения с погрешностью меньше 0,2 %, содержание пропана изменяли от 3,5 до 7,5 % в зависимости от начальных условий. Пропано-воздушная смесь из газометра поступала через газовый шланг с пламегасителем (рис.1. 6), краном (рис.1. 7) и расходомер (рис.1. 9) в камеру сгорания – канал (рис.1. 1). Газовоздушную смесь зажигали искровым разрядом от катушки между двумя электрическими электродами (рис.1. 5), встроенными в торцевой стенке канала (рис.1. 1). Фронт пламени (рис.1. 3) распространялся от закрытого края прямоугольного канала к открытому. Скорость распространения пламени измеряли, учитывая объемную концентрацию пропана в смеси с воздухом. Съемку распространения фронта пламени в плоском канале с поршнем производили методом прямого фотографирования через прозрачные стенки канала с помощью цифровой видеокамеры Canon Digital IXUS 950 IS. Скорость видеосъемки составляла 60 кадров в секунду.

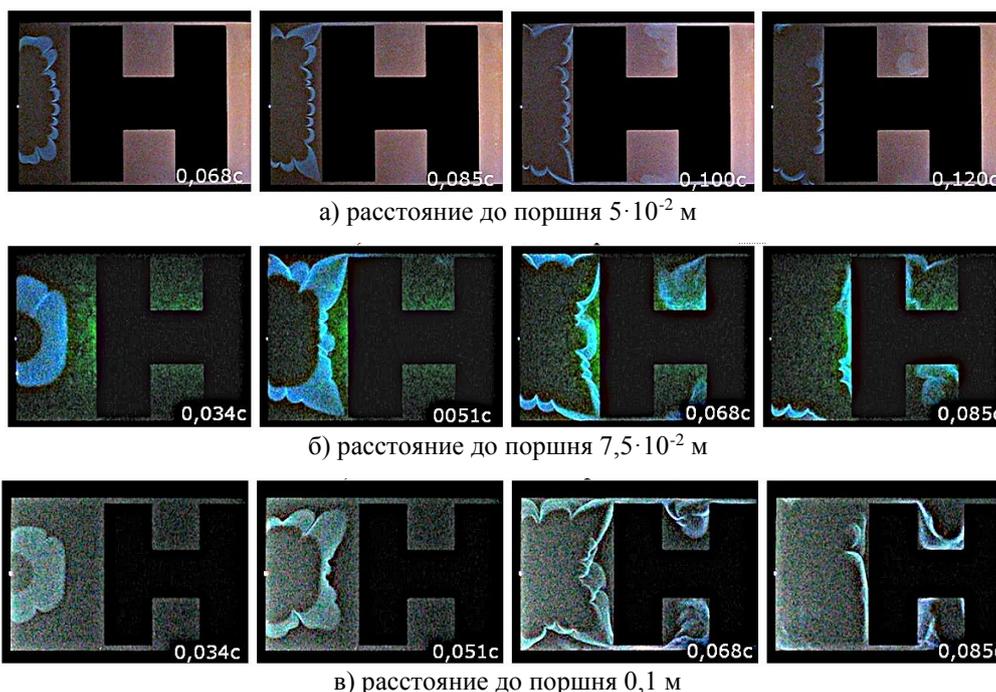


**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

- 1 – плоский канал – камера сгорания;  
 2 – цифровая видеокамера (вид сбоку); 3 – фронт пламени;  
 4 – плоский прямоугольный поршень; 5 – система электродов; 6 – пламегаситель;  
 7 – газовый шланг с краном; 8 – катушка зажигания с электрическими проводами;  
 9 – расходомер газа; 10 – газометр вытеснения

Опыты проводили при различных начальных объемах камеры сгорания. Фронт пламени (рис.1. 3), распространяясь в канале от точки зажигания до передней стенки поршня, проходил через зазоры между поршнем (рис.1. 4) и стенками канала (рис. 2). Из результатов многочисленных экспериментов определено, что при увеличении объема свободного рабочего пространства канала до критической величины происходило увеличение скорости распространения фронта пламени в канале.

Проникновение фронта пламени и продуктов сгорания газовой смеси в вырезы поршня создавало гидродинамическое «компрессионное» газовое кольцо (рис. 2). Из-за процессов, связанных с диффузионно-тепловой неустойчивостью на фронте пламени, формируются возмущения, и скорость распространения пламени, как и длина волны  $\lambda$ , прямо пропорциональны промежутку  $\delta$  между стенками прямоугольного канала при  $\delta \leq 10^{-2}$  м.



**Рис. 2. Состав смеси: 6,0% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + воздух, съемка 60 к/с**

Из кадров видеофильма, полученных в результате экспериментов, определено, что на поверхности фронта пламени еще до встречи с передней стенкой плоского поршня развиваются возмущения с длиной волны, сопоставимые с поперечными размерами камеры сгорания-канала. Также результатом прохождения фронта пламени между зазором, образованным стенками канала и поршнем, является возникновение турбулентной струи пламени. Далее скорость распространения фронта пламени увеличивается в несколько раз и возникающие деформации на поверхности фронта пламени равны расстоянию между боковыми стенками поршня и стенками канала.

Взаимосвязь скорости фронта за поршнем и длины волны пламени возмущения позволяет выявить физический механизм, влияющий на форму фронта и скорость его распространения в прямоугольном канале. Она представлена в виде зависимости отношения чисел Рейнольдса  $\frac{Re}{Re_0}$ . При расчете чисел Рейнольдса  $Re$  и  $Re_0$  использовали значения

скорости распространения фронта до и после прохождения поршня в камере сгорания, а в качестве расстояния между стенками канала применяли наименьшее.

Волновые свойства фронта пламени характеризует интервал длин волн  $\frac{\lambda}{\delta} \leq 10 \div 15$  к наименьшему поперечному размеру камеры сгорания. Изменение скорости распространения пламени в сторону уменьшения после прохождения пространства между поршнем и стенками канала объясняется перестройкой тепловой структуры пламени при понижении температуры, связанном с потерями тепла в стенки канала. Для области, соответствующей отношению  $\frac{\lambda}{\delta} \geq 20 \div 25$ , происходит распад фронта пламени и увеличение его поверхности при уменьшении потерь тепла в стенки камеры, что является причиной возрастания скорости его распространения. На рис. 3 представлен график зависимости скорости распространения фронта пламени после прохождения через зазор между поршнем и боковой стенкой канала от длины волны возмущения, где длина волны возмущения на поверхности фронта пламени по порядку величины равна ширине зазора.

Горение газа описывается формулой Аррениуса и в предположениях, что газ динамически несжимаем, его параметры будут описываться системой уравнений (1–4) в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho \times V) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + (V \times \nabla) \times \rho V = -\nabla p + \frac{1}{Re} \Delta V, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (V \times \nabla) \times T = \frac{1}{Re \times Pr \times \rho} \Delta T - \frac{Re \times Pr \times Ze^2 (\varepsilon - 1) \times \varepsilon}{2} \times a \times \exp\left(\frac{E}{\varepsilon} - \frac{E}{T}\right), \quad (3)$$

$$P = P_0 + M^2 \times p \text{ и } P_0 = \rho \times T = \text{const}, \quad (4)$$

где  $T$  и  $\rho$  – температура и плотность газа;

$t$  – время процесса;

$V$  – вектор скорости газа;

$P_0$  – термодинамическое постоянное давление в канале равное  $T \cdot \rho_0$ ;

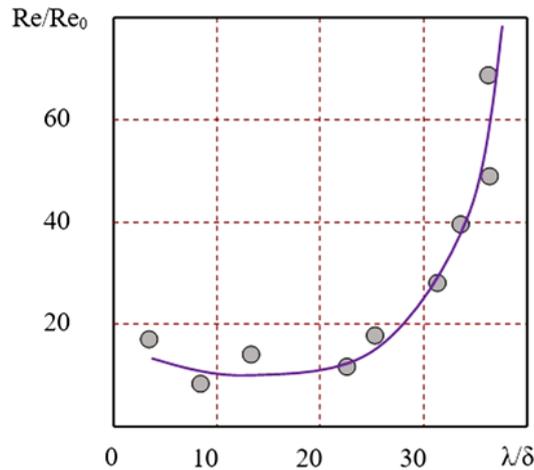
$p$  – динамическая компонента давления;

$E$  – энергия активации;

$\varepsilon$  – степень теплового расширения.

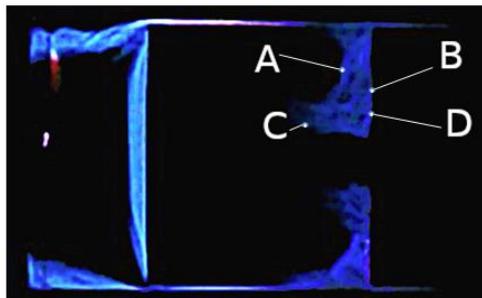
Расчетные величины связаны критериями подобия:  $Re = u_n \times d\rho/\nu$ ;  $Pr = \nu \times c_p/\chi = 1$ ;  $Le = \chi/c_p \times \rho_0 \times D = 1$ ,  $Ze = (\varepsilon - 1) \times (E/\varepsilon^2)$ , где  $\nu$ ,  $\chi$ ,  $D$  – коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии;  $\rho_0$  – плотность;  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении и число Маха  $M \ll 1$ .

Рассмотренная система уравнений позволяет описать процессы образования вихрей за поршнем в канале. Интенсивность вихря зависит от условий поджигания смеси и различного во времени количества сгораемого перед препятствием газа. Циркуляция, вычисленная вдоль замкнутых линий тока в вихре, имеет квадратичную зависимость от линий тока, а вихрь – другую структуру, чем при простом обтекании поршня фронтом пламени [9–12].



**Рис. 3. Зависимость скорости распространения фронта пламени после прохождения его через зазор между поршнем и боковой стенкой канала от длины волны возмущения**

Вихревое течение, возникающее при движении фронта пламени, происходит только в плоскости параллельной поверхности боковых стенок канала. Явление заметно, если имеется компонента скорости течения, касательная ко фронту пламени. Фиксация и объяснение данного эффекта позволяют получить дополнительные данные возникновения вихревых эффектов пламени и эволюции возмущений на поверхности фронта пламени. Становится понятен механизм возникновения возмущений на поверхности фронта пламени, который связан с появлением вращательного движения газа на фронте пламени. Длина волны пропорциональна скорости пламени и периоду его вращения, и амплитуда изменений на фронте поверхности пламени пропорциональна размерам вихря пламени [3, 4].



**Рис. 4. Формирование вихревых колец пламени в вырезах плоского поршня**

Вихри, появляющиеся за краями поршня вследствие неустойчивости течения пламени и смеси газов в слое смешения, при срывах с обтекаемого поршня, существенно влияют на процессы горения; пламя деформирует гидродинамическим полем сам вихрь, перераспределяя тепловые и диффузионные потоки, и расширяющиеся продукты горения создают течение за фронтом. Вихри искажают гидродинамический поток таким образом, что выпуклые в сторону свежей смеси участки пламени ускоряются, а вогнутые замедляются; и в результате этого амплитуда малых искривлений фронта нарастает. На рис. 4 представлен видео-

кадр экспериментов по фиксации образования вихря пламени в поршне. Точкой т. А показана левая часть формирующегося вихря пламени, т. С указывает на крайнюю ведущую точку пламени, т. В – правая часть вихревого пламени и т. Д – место догорания остатков смеси возле стенки канала. Заметно изменение структуры пламени и вследствие стретч-эффекта вытягивание пламени в угловую турбулентную струю, после чего происходит дробление части фронта пламени на отдельные фрагменты ограниченных размеров. Отток тепла начинается в районе ведущей точки фронта пламени т. С, здесь скорость горения меньше, чем в соседних участках выреза поршня.

Определяющими параметрами процессов в камере сгорания-канале служит число Рейнольдса, подсчитанное с учетом ширины канала, нормальной скорости распространения пламени в нем, вязкости газа, степени теплового расширения, размеров поршня и расстояния от точки воспламенения до передней стенки поршня. Из-за теплового расширения при сгорании в вихре линии тока приобретают спиралевидную форму. С увеличением степени теплового расширения растет поток газа через препятствие-поршень, а с ним – и интенсивность нарастания вихря. Затягивание вихря проявляется тем сильнее, чем выше значение числа Рейнольдса и степень теплового расширения. Когда пламя достигает стороны препятствия, обращенной к открытому концу канала, продукты сгорания между препятствием и вихрем деформируют и выталкивают его к открытому концу канала [8–11]. Возможен процесс обратного движения пламени в вырезы плоского поршня и пространства между поршнем и стенками камеры сгорания, вызванный релаксационными колебаниями в полуоткрытом канале (рис. 5). В вырезы поршня фронт пламени проникает уже со стороны открытой стороны канала, образуя вихрь, закручивающийся против часовой стрелки. В объеме канала за поршнем заметно догорание оставшейся смеси, святящееся на фотофрагменте эксперимента ярко-оранжевым цветом, также происходит проникновение пламени в пространство между точкой зажигания и передней стенкой поршня.

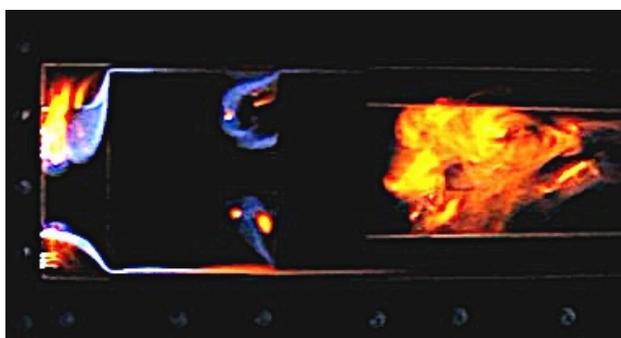


Рис. 5. Обратное проникновение пламени в вырезы плоского поршня и пространства между поршнем и стенками камеры сгорания

В плоском прямоугольном канале распространяющийся фронт пламени может деформироваться в двух направлениях, перпендикулярных друг другу. Радиусы фронтов искривляющегося пламени равны меньшему и большему промежуткам между стенками канала и вырезами поршня. Вихрь пламени, вызванный при его распространении в канале, имеет одну компоненту и определяется уравнением [3, 4]:

$$\Omega = -\frac{\alpha - 1}{\partial \alpha} \times \left( \frac{u_1}{Rc} + \frac{\partial u_2}{\partial \mu} \right). \quad (5)$$

Составляющая вектора плоского вихря в вырезе поршня и канале, направленная вдоль движения фронта пламени, равна  $\Omega = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}$ . Индексы 1 и 2 в уравнении (5) соответ-

ствуют: 1 – холодному газу перед фронтом и 2 – продуктам сгорания газозвушной смеси;  $w$  – величина скорости газа, перпендикулярная стенкам камеры;  $R_c$  – радиус кривизны линий течения;  $\alpha = \frac{\rho_1}{\rho_2}$  – коэффициент расширения газа пламени;  $\rho_1$  – плотность холодного газа и  $\rho_2$  – плотность продуктов сгорания;  $\mu$  – координата, направленная вдоль линий тока. Кривизна линий тока связана с гидродинамикой течения и пропорциональна кривизне фронта пламени. Эффект образования вихревого фронта пламени указывает на связь тепловых, диффузионных и гидродинамических процессов, которые взаимосвязаны с потерями устойчивости и формированием ячеистой структуры пламени.

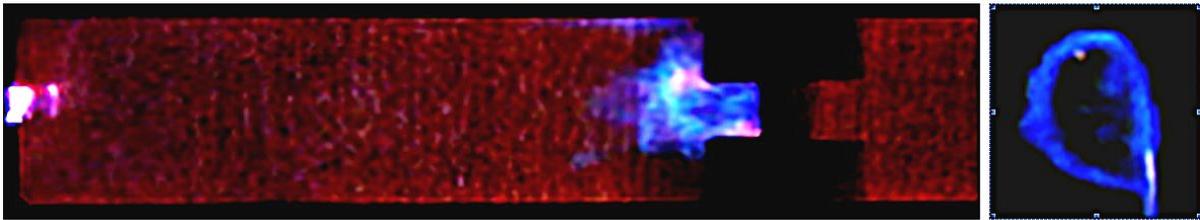


Рис. 6. Процесс образования вихревого кольца пламени в вырезе поршня, расположенного под углом  $90^\circ$  в канале

В прямоугольном канале, в котором один из размеров поперечного сечения меньше  $2,5 \times 10^{-3} \text{ м} \div 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , возмущения на фронте пламени формируют его ячеистую структуру и вихревое кольцо пламени в вырезе поршня, расположенного под углом  $90^\circ$  (рис. 6). Между стенками канала и фронтом пламени образуется область, содержащая несгоревшую смесь. Догорание пропано-воздушной смеси газов в этой области происходит спустя  $3 \cdot 10^{-2} \text{ с} \div 9 \cdot 10^{-2} \text{ с}$  после прохождения основной части фронта пламени. На рис. 7 представлена зависимость координаты ведущей точки фронта пламени в канале от времени распространения пламени. Скорость фронта пламени, резко возрастающая после зажигания газовой смеси, уменьшается около передней стенки поршня.

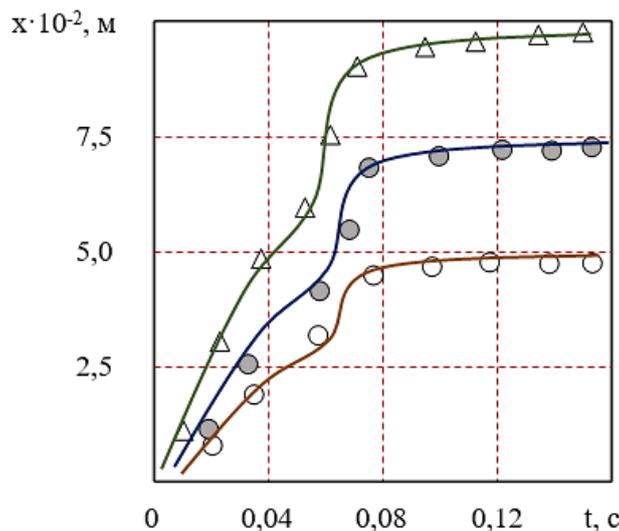


Рис. 7. Зависимость координаты фронта пламени от времени при различном положении неподвижного поршня в канале от точки зажигания: ○ –  $5 \times 10^{-2} \text{ м}$ ; ● –  $7,5 \times 10^{-2} \text{ м}$ ; △ –  $0,1 \text{ м}$

В результате экспериментов выявлено, что при определенных условиях в зазоре между поршнем и стенками канала происходит проскок пламени – фронт пламени проникает за пор-

шень. Обнаружено образование вихря в вырезе поршня и вихревое вращение пламени возле стенок канала. Определены зависимости формы фронта пламени от параметров эксперимента: длины и ширины канала, степени заполнения канала горючей смесью, связанной с объемом камеры сгорания и скорости распространения фронта пламени. Экспериментальные результаты, полученные в данной работе, расширяют сведения об особенностях распространения пропано-воздушного пламени в прямоугольных каналах с поршнем. При горении в канале с препятствием-поршнем возможно выталкивание вихря пламенем из канала и существование объемов несгоревшей смеси в сгоревшем газе с последующим догоранием. Фронт пламени может проходить через зазоры, размер которых меньше критического размера затухания; погасание пламени возможно в каналах более широких, чем критический размер препятствия.

В работе дано описание нескольких физических эффектов, связанных с изменением формы и скорости распространения фронта пламени, а также характера его взаимодействия с преградой-поршнем, находящимся в канале. Представлено объяснение физических механизмов, управляющих наблюдаемыми явлениями и связанных с неустойчивостью горения, вихреобразованием и тепломассопереносом вблизи фронта пламени. Показана практическая ценность обнаруженных физических эффектов для техники и промышленности, связанная с возможностью разработки более совершенного оборудования и безопасных технологий при конструировании двигателей внутреннего сгорания и горелочных устройств нового типа.

### Литература

1. Semenov O. Y. Simulation Of Hydrodynamic Phenomena Attendant On The Flame Front Propagation In A Tube Behind A Piston // *Technical Physics*. 2014. Vol. 59, No. 1. P. 52–59.
2. Semenov O. Y. Relaxation Combustion Of Gas Mixture In A Tube: Paradox piston motion // *Technical Physics Letters*. 2013. Vol. 39, No. 5. P. 435–437.
3. Зельдович Я. Б., Истратов А. Г., Кидин Н. И., Либрович В. Б. Гидродинамика течения и устойчивость искривленного фронта при распространении пламени в каналах : препринт № 143 ИПМ АН СССР. М., 1980. 72 с.
4. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М. : Наука. 1980. 478 с.
5. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение. М. : Физматгиз, 1961. 500 с.
6. Markstein G. H. Non-steady flame Propagation // Pergarmon, New York. 1964. P. 22.
7. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М. : Наука, 1988. 736 с.
8. Yakush S. E. Experimental Study On Cellular Premixed Propane Flames In A Narrow Gap Between Parallel Plates // *Combustion Science and Technology*. 2019. Vol. 191, No. 5. DOI 10.1080/00102202.2018.1521394.
9. Renard P.H., Thevenin D., Rolon J.C., Candel S. Dynamics of flame/vortex interactions // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2000. Vol. 26. P. 225–282.
10. Laverdant A., Candel S. Computation of diffusion and premixed flames rolled up in vortex structures // *J Propu Power*. 1989. Vol. 5(2). P. 134–143.
11. Fedorov A. V., Istratov A. G., Kidin N. I. The Study of Tulip-Configuration // *Second International Mediterranean Combustion Symposium*. Egypt, Sharm El-Sheikh. 2002. № 100/1.
12. Bernard T. L. Guenther Von Elbe Combustion, flames, and explosions of gases. Orlando : Academic Press, 1987. 739 p.
13. Самсонов В. П. Влияние состава горючей смеси на вихревую структуру в пламени // *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39. № 3. С. 1–6.
14. Schlichting H. Boundary-layer theory. New York : McGraw-Hill, 1955. 535 p.