

Научная статья

УДК 544.452.42

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179115>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫНУЖДЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ОКИСЛЕНИЕ МЕТАНА В КАНАЛЕ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ ЭНЕРГОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Константин Юрьевич Арефьев<sup>1✉</sup>, Анастасия Игоревна Крикунова<sup>2</sup>, Илья Максимович Гришин<sup>3</sup>,  
Александр Викторович Минко<sup>4</sup>, Михаил Александрович Ильченко<sup>5</sup>, Сергей Владимирович Заикин<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, Московская область, Россия

<sup>1, 3, 4, 5, 6</sup> Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,  
Москва, Россия

<sup>1</sup> arefyev.kj@mipt.ru✉

**Аннотация.** Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования акустической интенсификации процессов окисления метана в высокоэнтальпийном кислородсодержащем (по составу максимально приближенном к воздуху) потоке. Исследования проведены для конечного по длине канала постоянного сечения. Рассмотрен диапазон начальных удельных энтальпий кислородсодержащего потока от 1600 до 2400 кДж/кг. Выявлены закономерности влияния полной энтальпии кислородсодержащего потока и акустического воздействия на эффективность (с точки зрения завершенности химических реакций) окисления метана. Установлено влияние частоты акустического воздействия на коэффициент завершенности физико-химических процессов. Определены значения коэффициента избытка топлива для различных полных энтальпий кислородсодержащего потока, соответствующие диффузионному и кинетическому режимам окисления метана. Проведен анализ спектральных характеристик пульсаций статического давления в потоке, по результатам которого отмечена стабильность окисления метана на исследованных режимах.

**Ключевые слова:** окисление метана, кислородсодержащий поток, акустическое воздействие, диффузионный режим окисления, кинетический режим окисления, завершенность химических реакций

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке РФФИ грант № 20-79-10328.

**Для цитирования:** Арефьев К.Ю., Крикунова А.И., Гришин И.М., Минко А.В., Ильченко М.А., Заикин С.В. Исследование влияния вынужденных акустических колебаний на окисление метана в канале постоянного сечения энергосилового устройства // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 134–145. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179115>

Original article

## THE STUDY OF THE FORCED ACOUSTIC VIBRATIONS IMPACT ON THE METHANE OXIDATION PROCESS IN THE CONSTANT CROSS-SECTION CHANNEL OF THE POWER PLANT

Konstantin Yu. Aref'ev<sup>1✉</sup>, Anastasiya I. Krikunova<sup>2</sup>, Il'ya M. Grishin<sup>3</sup>, Aleksandr V. Minko<sup>4</sup>, Mikhail A. Il'chenko<sup>5</sup>, Sergei V. Zaikin<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),  
Dolgoprudny, Moscow Region, Russia

<sup>1, 3, 4, 5, 6</sup> Central Institute of Aviation Motors,  
Moscow, Russia

<sup>1</sup> arefyev.kj@mipt.ru<sup>✉</sup>

### Abstract

The flow acoustical impact is one of the prospective methods for methane oxidation intensification.

The objective of this research consists in conducting computational and experimental studies to reveal physico-chemical effects specifics and establishing basic regularities of the methane oxidation in a high-enthalpy oxygen-containing flow in a channel under the excitation of forced acoustic oscillations.

The study of the methane oxidation efficiency in a high-enthalpy quasi-air flow (HQAF) was conducted on the experimental setup with oxidation reactions realization in a constant cross-section channel.

One of the most significant efficiency indicators of the working process is the coefficient of the fuel oxidation physico-chemical processes completeness  $\eta$ .

The 3D numerical modeling of the working process in the flow path of the experimental setup was performed to explain in detail the results of experiments, reveal the physico-chemical processes specifics and analysis of the flow characteristics. The Favre-averaged system of Navier-Stokes equations, recorded for the compressible continuum medium was being solved in the course of computations. Methane oxidation with HQAF modeling was performed with the chemical reactions finite rates model Finite rate model and detailed kinetic mechanism.

The computational-experimental studies were being performed for the HQAF range of initial total enthalpies of  $H = 1600\text{--}2400$  kJ/kg. Three modes ( $H = 1600$  kJ/kg;  $H = 2000$  kJ/kg and  $H = 2400$  kJ/kg) were selected, for each of which the fuel excess ratio  $\varphi$  was varied in the range from 0.4 to 1.0. Computations and experiments were both without and with the acoustical impact (at frequencies of  $f = 300\text{--}1200$  Hz) on the methane supplied into the constant cross-section channel.

Computations and experiments allowed obtaining dependences of the coefficient of the fuel oxidation physico-chemical processes completeness  $\eta$  on the fuel excess coefficient  $\varphi$  for various initial enthalpies of the high-speed HQAF and for different values of the acoustical impact frequency.

Both computer and experimental values are matching satisfactorily (within 7%), which indicates a satisfactory modeling of the flow structure inside the channel. With the HQAF initial enthalpy increase, the coefficient of the fuel oxidation physico-chemical processes completeness  $\eta$  increases as well, which is associated with the increase in the chemical reactions rate and some changes in the reverse currents zone.

The article presents the dependences of the coefficient of the fuel oxidation physico-chemical processes completeness  $\eta$  on the frequency of the acoustical action  $f$  for different modes. As  $f$  increases, so does  $\eta$ , and the increase with that is of a monotonous linear growth in the range of the frequencies considered, which may indicate more intensive mixing of methane with oxidant. All presented dependences have a close inclination angle, which allows conclude that the acoustical impact has the same law of change for all considered modes.

The results of the dynamic processes analysis allowed drawing inference that the maximum values of the total relative amplitude of the pressure pulsations for the experimentally studied modes both with and without acoustical action do not exceed the values of 10%. This allows making a conclusion on the stability of the oxidation modes in a constant cross-section channel.

**Keywords:** methane oxidation, oxygen-containing flow, acoustical impact, diffusional oxidation mode, kinetic oxidation mode, chemical reactions completeness

**Funding:** the work was financed by the RSCF Grant no. 20-79-10328.

**For citation:** Aref'ev K. Yu., Krikunova A. I., Grishin I. M., Minko A. V., Il'chenko M. A., Zaikin S. V. The Study on the Forced Acoustic Vibrations Impact on the Methane Oxidation Process in the Constant Cross-Section Channel of the Power Plant. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 1, pp. 134–145. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179115>

## Введение

Развитие перспективных энергосиловых установок и повышение их эффективности связано с выбором наиболее подходящего горючего, обладающего необходимыми рабочими параметрами и отвечающего требованиям экономической целесообразности, позволяющего максимально использовать, запасенную в горючем химическую энергию при его сжигании. Одним из таких горючих является метан ( $\text{CH}_4$ ) [1]. По сравнению с другими горючими у метана есть ряд преимуществ: высокая теплота сгорания (более 55 МДж/кг), распространенность в природе, относительно низкая стоимость, безопасность и экологичность. В качестве окислителя для энергетических установок, работающих в пределах земной атмосферы, целесообразно использовать воздух. Однако из-за низкой скорости окисления организация эффективного сгорания метана с воздухом является сложной научно-экспериментальной задачей [2, 3], требующей разработки методов повышения коэффициента завершенности физико-химических процессов окисления [4, 5] посредством стабилизации фронта пламени, а также интенсификации диффузионных и кинетических процессов.

Из-за ограниченности размеров камеры сгорания время пребывания топливной смеси в ней обычно составляет не более 5 мс, а скорость течения может значительно превышать скорость распространения фронта пламени в воздушно-метановой смеси [6]. Для обеспечения самовоспламенения и устойчивого окисления метана в рассматриваемых условиях приходится использовать специальные методы стабилизации фронта пламени и интенсификации процессов окисления:

- газодинамические методы, основанные на формировании рециркуляционных зон, в которых увеличивается время пребывания реагирующей смеси [7, 8];

- электрофизические и плазменные методы, основанные на ускорении кинетических процессов в реагирующей смеси за счет ионизации газа в локальных областях течения [9];

- химические методы, основанные на добавлении в реагирующую смесь химически активных компонентов различной природы [10];

- термодинамические методы, основанные на повышении начальной энтальпии потока [11].

Одним из перспективных способов интенсификации окисления метана в диффузионном режиме является акустическое воздействие на поток. Анализ известных работ показал, что современные исследования не позволяют полностью описать эффекты, связанные с протеканием сопряженных физико-макрокинетических процессов при горе-

нии метана в условиях вынужденных акустических колебаний. В публикациях отсутствуют детальные расчетно-экспериментальные данные, относящиеся к акустической интенсификации окисления воздушно-метановых смесей при высоких скоростях потока в каналах.

Цель настоящей работы – с помощью расчетно-экспериментальных исследований выявить особенности физико-химических эффектов и установить базовые закономерности окисления метана в высокоэнтальпийном кислородсодержащем потоке в канале при возбуждении вынужденных акустических колебаний.

## Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Учитывая многостадийность физических и химических процессов, исследование эффективности окисления метана в высокоэнтальпийном квазिवоздушном потоке (ВКП) целесообразно проводить на установке с реализацией окислительных реакций в канале постоянного сечения [12]. В настоящей работе исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

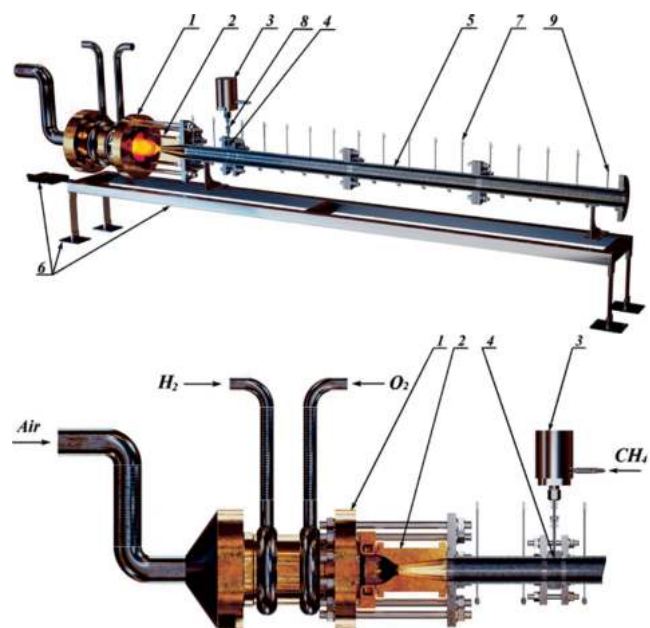


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – ГВКП; 2 – формирователь потока;
- 3 – УВАК; 4 – форсунка подачи метана;
- 5 – канал постоянного сечения;
- 6 – система измерения силы;
- 7 – пьезорезистивные датчики давления (17 датчиков по длине канала);
- 8, 9 – пьезоэлектрические датчики давления для регистрации быстропротекающих процессов после УВАК и в канале

Установка состоит из генератора высокоэн- тальпийного квазिवоздушного потока (ГВКП) 1, формирователя потока 2, устройства возбуждения акустических колебаний (УВАК) 3, форсунки подачи метана 4, канала постоянного сечения 5, а также системы измерения силы, создаваемой установкой (соответствует импульсу потока в выходном сечении канала) 6. Система измерения силы в свою очередь состоит из тензорезисторного датчика, рамы и безимпульсных патрубков подачи воздуха, водорода и кислорода. В установке предусмотрены 17 пьезорезистивных датчиков давления 7 (три до места инъекции метана и четырнадцать – после), пьезоэлектрические датчики давления для регистрации быстропротекающих процессов после УВАК 8 и в канале постоянного сечения 9.

Методика проведения эксперимента заключается в следующем. Формирование ВКП осуществляется в ГВКП 4. Метан подается в канал постоянного сечения 5 через УВАК 3, обеспечивающий требуемые значения частоты акустического воздействия, и струйную форсунку 4 диаметром 3 мм, расположенную перпендикулярно потоку ВКП. Канал 5 имеет круглое поперечное сечение с площадью 1964 мм<sup>2</sup> и длину 1400 мм. После смешивания метана с высокоскоростным ВКП происходит его окисление в канале постоянного сечения 5 с дальнейшим истечением образовавшейся смеси через выходное сечение канала 5 в окружающую атмосферу.

УВАК 3 представляет собой устройство, в котором изменяется частота акустических колебаний посредством турбины (доля мощности, потребляемой турбиной, установленной в устройстве возбуждения акустических колебаний, от общей мощности по оценочным данным составляет не более 2%), воздействующей на поток метана, подающегося в канал постоянного сечения 5.

Одним из наиболее значимых показателей эффективности рабочего процесса является коэффициент завершенности физико-химических процессов окисления топлива  $\eta$  [13]. Поэтому важный аспект исследования окисления метана в канале постоянного сечения – косвенное измерение коэффициента  $\eta$ . В настоящей работе использован подход, достаточно подробно описанный в [12]. Приведенные погрешности косвенного измерения коэффициента  $\eta$  не превышают  $\pm 3,5\%$ .

### Математическая модель неравновесного течения

Для детального объяснения результатов экспериментов и выявления особенностей физико-химических процессов и анализа характеристик течения выполнено трехмерное численное моде-

лирование рабочего процесса в проточном тракте экспериментальной установки. В ходе расчетов решалась осредненная по Фавру система уравнений Навье–Стокса, записанная для вязкой сжимаемой неразрывной среды [14]. Система замыкается с помощью уравнения состояния идеального газа и двухпараметрической модели турбулентности  $k-\omega$  Standard [15]. Данная модель позволяет более корректно моделировать турбулентность в пристеночной области и, следовательно, более точно определить положение точки отрыва потока. Результаты исследований, представленные в работе [16], показали, что моделирование течений в сверхзвуковых аэродинамических трубах с помощью модели турбулентности  $k-\omega$  Standard позволяет получить хорошее соответствие с экспериментальными данными. Дискретизация по пространству выполнялась со вторым порядком точности. В качестве схемы вычисления потоков на границах ячеек использовалась схема расщепления AUSM+ [17].

Окисление метана с ВКП моделировалось с использованием модели конечных скоростей химических реакций (Finite rate model) [18] и детального кинетического механизма, включающего в себя 32 компонента и 177 элементарных реакций. Интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений химической кинетики осуществляется с использованием жесткого решателя (Stiff Chemistry solver) [19].

В качестве граничных условий на входной и выходной границах задавались полное давление, термодинамические параметры газа, концентрации компонент и параметры турбулентности. Для учета теплоотвода в стенки проточного тракта задавалась их температура, равная 800 К (527°C).

Акустическое воздействие моделировалось с помощью зависимости давления метана  $p_{in}$  от времени  $t$  на входной границе по закону:

$$p_{in}(t) = p_{nom} [1 + A \sin(2\pi f t)],$$

где  $p_{nom}$  – давление подачи метана без акустического воздействия;  $f = 0 \dots 1190$  Гц – частота пульсаций давления;  $A = 0,1$  – относительная амплитуда пульсаций давления.

Для численного моделирования использовалась неструктурированная призматическая расчетная сетка (рис. 2). В местах наибольших градиентов газодинамических характеристик потока (вблизи стенок и вблизи места инъекции метана в канал постоянного сечения) применялось сгущение (уменьшение характерного размера ячеек) расчетной сетки. Характерный размер ячеек был выбран в диапазоне 0,25 ... 5 мм. Общее число ячеек расчетной сетки составило  $\approx 0,75$  млн.

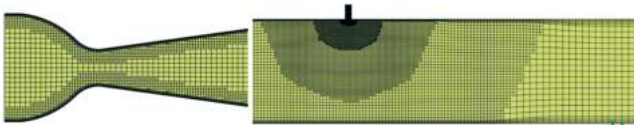


Рис. 2. Расчетная сетка в районе критического сечения (слева) и области подачи метана (справа). Для разрешения газодинамических особенностей течения в области подачи метана применено сгущение сетки

### Комплексный анализ результатов экспериментов и расчетов

Расчетно-экспериментальные исследования проводились для диапазона начальных полных энтальпий ВКП  $H = 1600 \dots 2400$  кДж/кг. Такой диапазон  $H$  соответствует полным температурам ВКП на входе в канал от 1700 до 2300 К. Выбраны три режима ( $H = 1600$  кДж/кг;  $H = 2000$  кДж/кг и  $H = 2400$  кДж/кг), для каждого из которых варьировался коэффициент избытка топлива  $\varphi$  (метана по отношению к содержанию свободного кислорода в ВКП после ГВКП) в диапазоне от 0,4 до 1,0. Давление в канале постоянного сечения на каждом режиме не превышало 0,6 МПа. Массовый расход ВКП составлял 0,87 кг/с.

Расчеты и эксперименты проводились как без акустического воздействия на подаваемый в канал постоянного сечения метан, так и с ним (при частотах  $f = 300 \dots 1200$  Гц).

На рис. 3 показана экспериментальная установка во время окисления метана в канале постоянного сечения.

Для более подробного анализа газодинамических процессов при окислении метана в канале рассмотрим результаты численного моделирования течения до и после подачи метана. Расчетные распределения осредненных по времени основных газодинамических величин: числа Маха и относительного полного давления ( $p_{\text{отн}}^* = p^* / p_{\text{ГВКП}}^*$ , где  $p^*$  – местное полное давление;  $p_{\text{ГВКП}}^*$  – полное давление в ГВКП) – показаны на рис. 4.

Анализ результатов, представленных на рис. 4,а, показал следующее. В формирователе потока происходит разгон ВКП до сверхзвуковых скоростей, в выходном сечении формирователя (на входе в



Рис. 3. Фотография экспериментальной установки

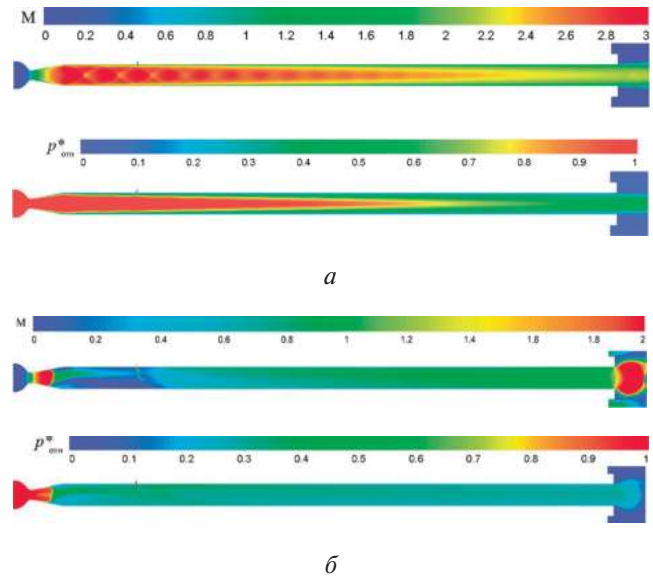


Рис. 4. Поля распределения газодинамических величин в плоскости симметрии канала:

а –  $\varphi = 0$ ,  $H = 1600$  кДж/кг;

б –  $\varphi = 1$ ,  $H = 1600$  кДж/кг

канал постоянного сечения) реализуется течение со скоростью  $v \approx 1680$  м/с, соответствующей числу Маха  $M = 3,06$ . По всей длине канала сохраняется безотрывное сверхзвуковое течение, однако ввиду большой степени удлинения канала из-за сил вязкого трения существенно нарастает пограничный слой, что приводит к постепенному снижению скорости потока. На выходе из канала скорость потока составила  $v \approx 1260$  м/с, что соответствует числу Маха  $M = 1,89$ .

Поля распределения с подачей метана (с трансзвуковой скоростью) в проточный тракт показаны на рис. 4,б и в. После подачи метана он интенсивно окисляется в ВКП, и структура течения изменяется. Вследствие экзотермических реакций при окислении метана в канале постоянного сечения скорость течения снижается до дозвукового уровня. Поток тормозится (за счет теплового дросселирования) в расширяющейся части формирователя потока в скачке уплотнения, близком к прямому; положение скачка уплотнения хорошо видно по полю распределения относительного полного давления. Присутствует зона возвратных токов между скачком уплотнения и местом подачи метана. После участка подачи метана из-за выделения тепла поток разгоняется, зон возвратных токов не наблюдается; по мере приближения к конечной части канала постоянного сечения течение становится трансзвуковым.

Поля распределения массовых концентраций гидроксильного радикала OH, продуктов сгорания  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , метана  $\text{CH}_4$  и кислорода  $\text{O}_2$  в плоскости

симметрии канала для режимов  $H = 1600$  кДж/кг;  $\varphi = 0.5$  и  $\varphi = 1$  без акустического воздействия ( $f = 0$ ) представлены на рис. 5 и 6.

По полям распределения массовой концентрации гидроксильного радикала ОН видно, что метан воспламеняется с некоторой задержкой, а зона окисления метана изменяется от центра канала к его нижней части (в плоскости симметрии) с увеличением продольной координаты. На режиме подачи метана  $\varphi = 1$  концентрация ОН плавно снижается к середине проточного тракта. Следует отметить, что на удалении  $L_1$  область горения представляет собой кольцо, поэтому в плоскости симметрии наблюдаются две зоны, в которых инициируется окисление, первая из которых локализуется вблизи верхней части канала, а вторая – вблизи нижней. Продукты окисления ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) распределяются неравномерно, в нижней части канала концентрация выше, чем в верхней, и описанное распределение сохраняется вдоль всей длины проточного

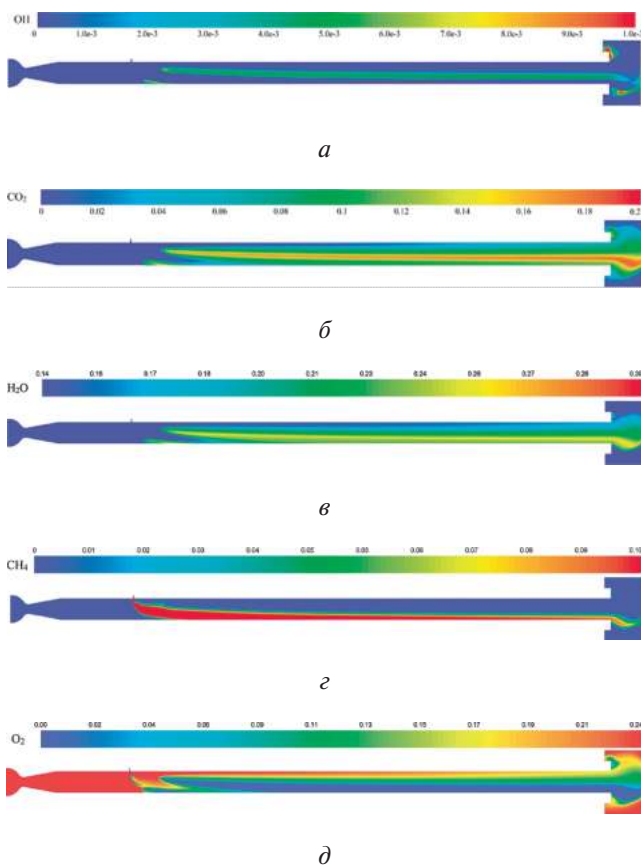


Рис. 5. Поля газодинамических величин в плоскости симметрии канала после подачи метана,  $\varphi = 1$ ,  $H = 1600$  кДж/кг,  $f = 0$ :  
а – поле массовой концентрации ОН;  
б – поле массовой концентрации  $\text{CO}_2$ ;  
в – поле массовой концентрации  $\text{H}_2\text{O}$ ;  
з – поле массовой концентрации  $\text{CH}_4$ ;  
д – поле массовой концентрации  $\text{O}_2$

тракта. Из анализа приведенных рисунков можно сделать вывод, что ниже по потоку (на расстоянии от 3 до 5 калибров от места воспламенения) непрореагировавший метан локализуется в основном в нижней части канала, где происходит его постепенное окисление с находящимся в данной зоне кислородом. При этом располагаемой длины канала недостаточно для окончательного смешения реагентов и полного окисления метана. Неравномерность распределения продуктов окисления говорит о том, что коэффициент завершенности физико-химических процессов  $\eta$  в рассматриваемом расчете меньше единицы, и для его увеличения необходимо интенсифицировать смешение реагентов и окисление метана.

При коэффициенте избытка топлива  $\varphi = 0,5$  большая часть метана успевает окислиться на расстоянии 7–8 калибров проточного тракта от места подачи, расстояние от места подачи метана до точки воспламенения обозначено на рис. 6 как  $L_1$ . В выходном сечении имеется равномерное распределение  $\text{CO}_2$ , что говорит о более высоком уровне смешения метана с окислителем, чем на режиме  $\varphi = 1$ .

Поля распределения осредненных по времени массовой концентрации углекислого газа  $\text{CO}_2$ , гидроксильного радикала ОН в плоскости симметрии канала для режима  $H = 1600$  кДж/кг;  $\varphi = 0,5$  с акустическим воздействием ( $f = 1170$  Гц) представлены на рис. 7.

В расчете с акустическим воздействием течение в области подачи метана имеет пульсационный характер, задержка воспламенения незначительно увеличивается (расстояние от места подачи метана до точки воспламенения обозначено как  $L_2$ ,  $L_2 > L_1$ ). Несмотря на увеличение задержки воспламенения, на удалении 6–7 калибров от места подачи метана распределение гидроксильного радикала ОН более равномерное, что говорит о лучшем смешении метана с потоком окислителя. Среднеквадратичное отклонение массовой концентрации ОН от средней (рассчитывается как  $g_{\text{ОН,ср}} = G_{\text{ОН}}/F_{ch}$ , где  $G_{\text{ОН}}$  – общий расход компонента ОН в сечении канала площадью  $F_{ch}$ ) для режима без пульсаций составляет 0,518, для режима с пульсациями – 0,585, то есть интенсивность реакции повышается на 11%.

На представленных (рис. 8) полях распределения гидроксильного радикала ОН в поперечных сечениях проточного тракта видно, что без акустического воздействия концентрация этого радикала выше в начальных сечениях, и к концу камеры все еще остается некоторое количество ОН в потоке. При акустическом воздействии на поток зона интенсивного окисления метана сосредоточена на меньшей длине камеры, и в конечном сечении концентра-

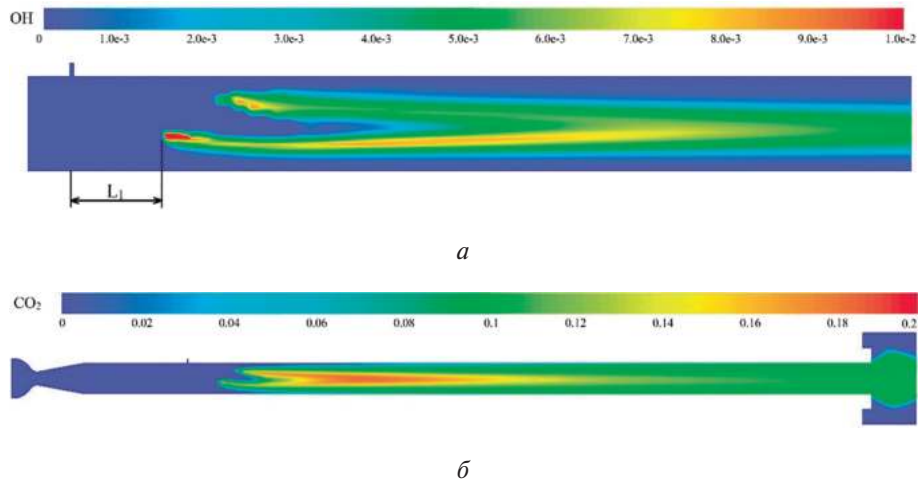


Рис. 6. Поля газодинамических величин в плоскости симметрии канала после подачи метана,  $\phi = 0,5$ ;  $H = 1600$  кДж/кг;  $f = 0$ : *a* – поле массовой концентрации OH; *б* – поле массовой концентрации  $\text{CO}_2$

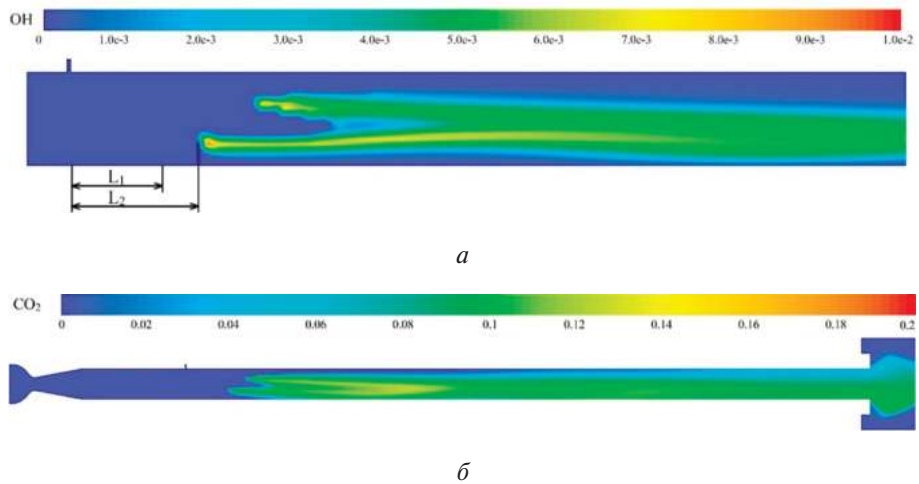


Рис. 7. Поля газодинамических величин в плоскости симметрии канала после подачи метана,  $\phi = 0,5$ ;  $H = 1600$  кДж/кг;  $f = 1170$  Гц: *a* – поле массовой концентрации OH; *б* – поле массовой концентрации  $\text{CO}_2$

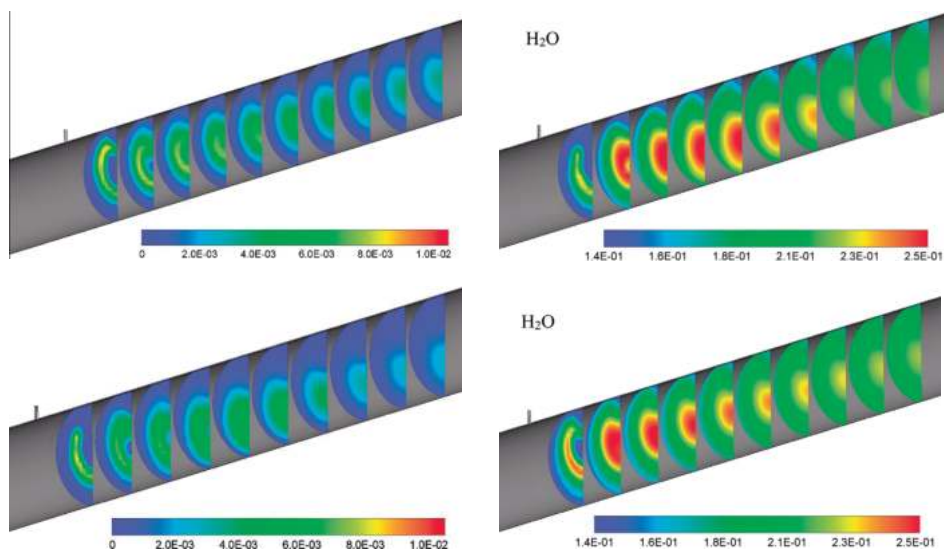


Рис. 8. Поля концентраций гидроксильного радикала в поперечных сечениях камеры на режиме  $\phi = 0,5$ ,  $H = 1600$  кДж/кг: *a* –  $f = 0$ ; *б* –  $f = 1170$  Гц

Таблица 2

Результаты экспериментальных и расчетных исследований с акустическим воздействием

$H = 1600$ кДж/кг				$H = 2000$ кДж/кг			$H = 2400$ кДж/кг		
$\varphi$	$f$ , Гц	$\eta$	$\eta_{calc}$	$\varphi$	$f$ , Гц	$\eta$	$\varphi$	$f$ , Гц	$\eta$
0,67	320	0,75	0,77	0,98	1190	0,72	1,02	1185	0,74
0,63	1190	0,80		0,95	400	0,70			
0,52	1170	0,79	0,75						
0,39	1180	0,76							

ция ОН значительно (на 40–45%) меньше, чем без акустического воздействия. По полю распределения продукта окисления  $H_2O$  также видно, что акустическое воздействие приводит к увеличению концентрации  $H_2O$  в начальных сечениях. В отсутствие акустического воздействия область окисления горючего смещается в нижнюю часть канала. В свою очередь, при наличии акустического воздействия распределение горючего в канале и, как следствие, продуктов его сгорания, более равномерно. Таким образом, подтверждается предположение об интенсификации процесса окисления акустическим воздействием.

В результате расчетов и экспериментов получены зависимости коэффициента завершенности физико-химических процессов  $\eta$  от коэффициента избытка топлива  $\varphi$  при различных начальных энтальпиях высокоскоростного ВКП и при различных значениях частоты акустического воздействия. Результирующие значения  $\eta$  приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты экспериментальных и расчетных исследований без акустического воздействия

$H = 1600$ кДж/кг			$H = 2000$ кДж/кг		$H = 2400$ кДж/кг	
$\varphi$	$\eta$	$\eta_{calc}$	$\varphi$	$\eta$	$\varphi$	$\eta$
1,00	0,63	0,61	1,00	0,66	1,00	0,68
0,93	0,65		0,65	0,78	0,91	0,72
0,67	0,71	0,68	0,50	0,83	0,67	0,81
0,50	0,67	0,66	0,40	0,81	0,63	0,85
0,43	0,62					

Из табл. 1 и 2 видно, что коэффициент завершенности физико-химических процессов  $\eta$  принимает более низкие значения в численном моделировании. Это, вероятно, объясняется заниженной температурой стенки проточного тракта при проведении расчетов, что увеличивало тепловые потери. Несмотря на это, расчетные и экспериментальные значения в достаточной степени совпадают (в пределах 7%), что указывает на удовлетворительное моделирование структуры течения внутри канала.

На рис. 9 приведены зависимости на основе полученных экспериментальных данных. Как видно, при росте начальной энтальпии ВКП коэффициент завершенности физико-химических процессов  $\eta$  увеличивается, что объясняется увеличением скорости химических реакций и некоторым изменением зоны обратных токов. На основе анализа экспериментальных данных определено, что зависимости 1 и 2 с уменьшением коэффициента избытка топлива  $\varphi$  сначала показывают монотонный рост  $\eta$  до определенного максимума, а при дальнейшем уменьшении  $\varphi$  начинается спад  $\eta$ . Полученные зависимости качественно согласуются с результатами исследований авторов работы [5].

Для различных режимов приведены зависимости (рис. 10) коэффициента завершенности физико-химических процессов  $\eta$  от частоты акустического воздействия  $f$ . Как видно, при увеличении  $f$ , также увеличивается  $\eta$ , причем увеличение имеет монотонный линейный рост в области

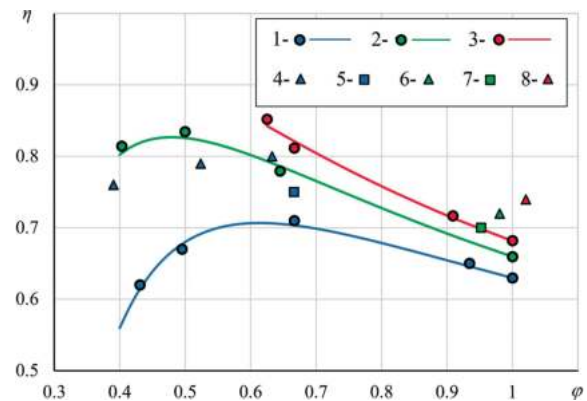


Рис. 9. Зависимости коэффициента завершенности физико-химических процессов  $\eta$  от коэффициента избытка топлива  $\varphi$ :  
 1 –  $H = 1600$  кДж/кг,  $f = 0$  Гц;  
 2 –  $H = 2000$  кДж/кг,  $f = 0$  Гц;  
 3 –  $H = 2400$  кДж/кг,  $f = 0$  Гц;  
 4 –  $H = 1600$  кДж/кг,  $f = 1170 \dots 1190$  Гц;  
 5 –  $H = 1600$  кДж/кг,  $f = 320$  Гц;  
 6 –  $H = 2000$  кДж/кг,  $f = 1190$  Гц;  
 7 –  $H = 2000$  кДж/кг,  $f = 400$  Гц;  
 8 –  $H = 2400$  кДж/кг,  $f = 1185$  Гц



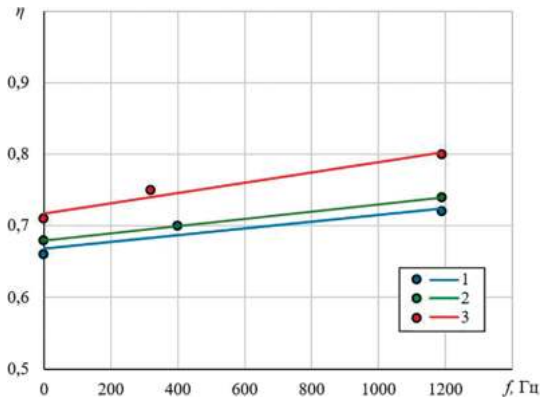


Рис. 10. Зависимости коэффициента завершения физико-химических процессов  $\eta$  от частоты акустического воздействия  $f$ :  
1 –  $H = 2000$  кДж/кг,  $\varphi = 1$ ;  
2 –  $H = 2400$  кДж/кг,  $\varphi = 1$ ;  
3 –  $H = 1600$  кДж/кг,  $\varphi = 0,65$

рассматриваемых частот, что может говорить о более интенсивном перемешивании метана с окислителем. Ввиду того что расчетные и экспериментальные данные согласуются с достаточной точностью (расхождение менее 5% по значению  $\eta$ ), можно говорить о том, что физические эффекты, влияющие на рабочий процесс в рассматриваемом канале и установленные по результатам расчетов, могут быть применены и в эксперименте. Все представленные аппроксимированные зависимости имеют близкий угол наклона, исходя из чего можно установить, что влияние акустического воздействия одинаково на всех рассматриваемых режимах. Для определения влияния  $f$  на  $\eta$  при больших значениях  $f$  необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Одним из факторов увеличения коэффициента завершения физико-химических процессов  $\eta$  от акустического воздействия может являться реализация пространственно-локализованных зон, в которых происходит интенсивное турбулентное перемешивание метана с ВКП в области подачи в канал постоянного сечения. Данные зоны возникают из-за пульсаций скорости, поперечный градиент которых обеспечивает усиление касательных напряжений в потоке.

В этом случае крайне важен анализ динамических процессов [20] при окислении метана в канале постоянного сечения. Одними из основных экспериментально полученных параметров, по которым можно сделать выводы о значении амплитуды и частоты динамических процессов в канале постоянного сечения, являются временные реализации и спектры нестационарных сигналов давления, зарегистрированные во время испытаний. Анализ полученных данных может дать новые знания о

турбулентном окислении метана и возникновении термоакустических неустойчивостей.

Для решения поставленных задач были измерены пульсации давления в экспериментальной установке. Исследование динамических процессов может быть основано на анализе спектрограммы, которая характеризует зависимость амплитуды и частоты пульсаций в виде функции от времени.

Спектр сигнала пульсаций давления в экспериментальной установке при реализации окисления метана без акустического воздействия (рис. 11) содержит доминирующую дискретную составляющую на частоте  $f \approx 46$  Гц. На рис. 11:  $A_f$  – амплитуда спектральных составляющих,  $f$  – частота,  $t$  – время.

Одновременно проведено исследование динамических процессов при окислении метана с акустическим воздействием на одном из режимов (рис. 12).

При работе УВАК генерируется основная частота  $f = 300$  Гц, с которой метан поступает в канал постоянного сечения. Как видно из анализа динамических процессов, при акустическом воздействии после УВАК амплитуда вынужденных колебаний с частотой  $f = 300$  Гц также практически не изменяется. Спектр сигнала пульсаций давления вынужденных колебаний содержит явно выраженную на данной частоте дискретную составляющую (рис. 12,а). Однако при измерении быстропротекающих процессов в выходной области канала постоянного сечения (рис. 12,б) эта дискретная составляющая отсутствует, а присутствует только доминирующая дискретная составляющая на частоте  $f \approx 46$  Гц, что свидетельствует о затухании колебаний, возбуждаемых УВАК по длине канала постоянного сечения, либо о том, что вынужденные колебания не проходят дальше форсунки, через которую подается метан.

В результате получено, что максимальные значения суммарной относительной амплитуды пульсаций давления на экспериментально исследованных режимах при акустическом воздействии и без него

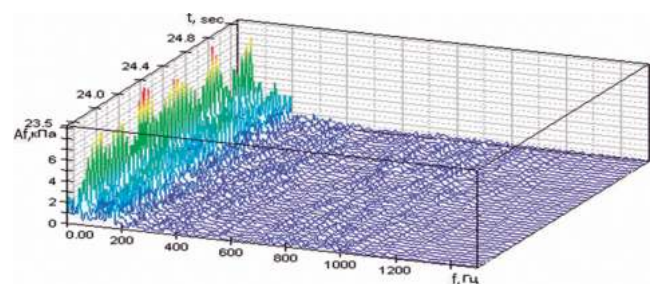


Рис. 11. Спектрограмма пульсаций давления в экспериментальной установке без акустического воздействия

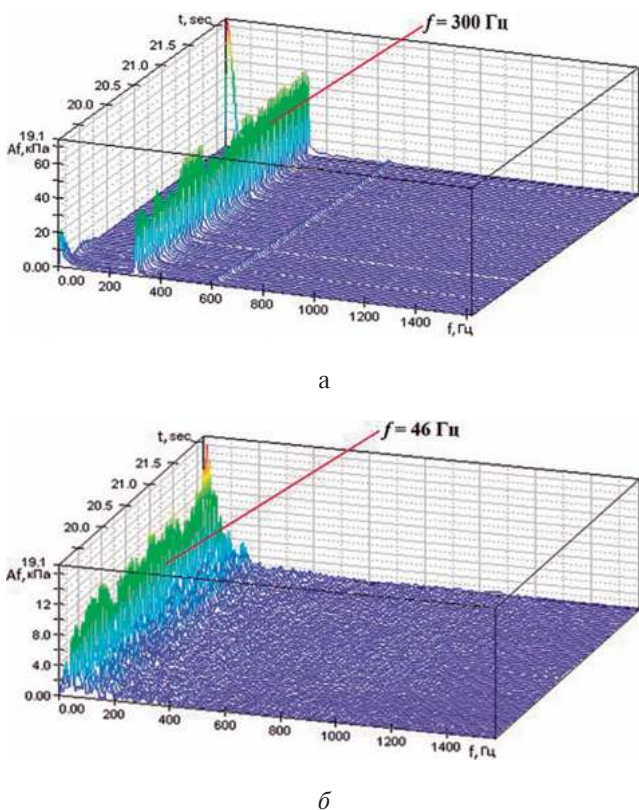


Рис. 12. Спектрограмма пульсаций давления в экспериментальной установке с акустическим воздействием: а – измерение после УВАК; б – измерение в выходной области канала постоянного сечения

не превышают значений 10%. Это позволяет заключить, что режимы окисления в канале постоянного сечения являются устойчивыми.

## Выводы

В результате расчетно-экспериментального исследования газодинамической интенсификации и стабилизации окисления метана в высокоэнтальпийном кислородсодержащем потоке установлено следующее:

1. Повышение полной энтальпии от 1600 до 2400 кДж/кг приводит к росту коэффициента завершенности физико-химических процессов до 30%. Максимальный коэффициент завершенности физико-химических процессов в рассматриваемой установке достигает значения 0,85.
2. Акустическое воздействие позволяет повысить коэффициент завершенности физико-химических процессов на 10–12%.
3. Увеличение частоты акустического воздействия от 400 до 1200 Гц увеличивает коэффициент завершенности физико-химических процессов на 4–7%. При этом указанная зависимость близка

к линейной в области рассматриваемых частот.

4. С ростом полной энтальпии ВКП положение экстремума коэффициента завершенности физико-химических процессов смещается в область меньших значений коэффициента избытка топлива. При коэффициенте избытка топлива, меньшем переходного значения, режим окисления метана – кинетический, а при больших значениях – диффузионный.

5. При стабильном окислении метана максимальные относительные амплитуды пульсаций давления достигают уровня 3% и реализуются при частоте 46 Гц.

## Список источников

1. Калугин К.С., Сухов А.В. Особенности использования метана в качестве горючего для жидкостных ракетных двигателей // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 120–132.
2. Бакланов А.В. Применение многопламенного горения в камере сгорания для повышения эффективности сжигания газа // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 88–94. DOI: 10.34759/vst-2022-2-88-94
3. Зубрилин И.А., Диденко А.А., Дмитриев Д.Н., Гураков Н.И., Эрнандэс Моралес М. Влияние процесса горения на структуру закрученного потока за горелочным устройством камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 124–136.
4. Воронцовский А.В., Макаров Д.В., Скибин А.П. и др. Расчет процессов горения и охлаждения в малогабаритной камере сгорания // Математическое моделирование. 1999. Т. 11. № 4. С. 29–36.
5. Аверьков И.С., Александров В.Ю., Арефьев К.Ю. и др. Влияние полноты сгорания топлива на характеристики прямоточных воздушно-реактивных двигателей // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 6. С. 939–949. DOI: 10.7868/S0040364416050045
6. Бартльме Ф. Газодинамика горения / Перевод с нем. А.В. Куршакова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 278 с.
7. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М., Котовский В.Н. Теория авиационных двигателей. В 2 частях: Учебник. – М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. – (366 + 448) с.
8. Албегов Р.В., Виноградов В.А., Шихман Ю.М. Горение метана при различных схемах впрыска в воздушный поток с большими дозвуковыми скоростями // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 1. С. 18–29. DOI: 10.1134/S0010508216010020
9. Arefyev K. Yu., Krikunova A. I., Panov V. A. Complex Effect of Electric and Acoustic Fields on Air-methane Flame Blow-off Characteristics // High Temperature. 2019. Vol. 57. No. 6, pp. 909–915. DOI: 10.1134/S0018151X19060026
10. Yu M., Zheng K., Zheng L. et al. Effects of hydrogen addition on propagation characteristics of premixed methane/

- air flames // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2015, vol. 34, pp. 1-9.
11. Grishin I., Zakharov V., Aref'ev K. Experimental Study of Methane Combustion Efficiency in a High-Enthalpy Oxygen-Containing Flow // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 2: 899. DOI: 10.3390/app12020899
  12. Арефьев К.Ю., Кукушинов Н.В., Серпинский О.С. Методика экспериментального определения полноты сгорания потоков топливной смеси в каналах переменного сечения // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2017. № 5. С. 90–102. DOI: 10.7868/S0568528117050103
  13. Аннушкин М.Ю. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // *Физика горения и взрыва*. 1981. № 4. С. 59–71.
  14. Бекетаева А.О., Найманова А.Ж. Численное исследование пространственного сверхзвукового течения совершенного газа при наличии поперечного вдува струи // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52. № 6(310). С. 58–68.
  15. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // *AIAA Journal*. 2009. Vol. 47. No. 12, pp. 2894–2906. DOI: 10.2514/1.42362
  16. Захаров В.С., Гуськов О.В., Прохоров А.Н., Бережной В.Н. Расчетно-экспериментальные исследования влияния формы сверхзвуковой части сопла на структуру течения в газодинамическом тракте модельного высотного стенда // *Теплофизика и аэромеханика*. 2021. № 2. С. 165–186.
  17. Liou M.-S. A sequel to AUSM, Part II: AUSM+–up for all speeds // *Journal of Computational Physics*. 2006. Vol. 214. No. 1, pp. 137–170. DOI: 10.1016/j.jcp.2005.09.020
  18. Luan Y.-T., Chyou Y.-P., Wang T. Numerical Analysis of Gasification Performance via Finite-Rate Model in a Cross-Type Two-Stage Gasifier // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013. Vol. 57. No. 2, pp. 558–566. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.026
  19. Xu C., Gao Y., Ren Z., Lu T. A Sparse Stiff Chemistry Solver Based on Dynamic Adaptive Integration for Efficient Combustion Simulation // *Combustion and Flame*. 2016. Vol. 172, pp. 183–193. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2016.07.009
  20. Арефьев К.Ю., Воронецкий А.В., Ильченко М.А., Сучков С.А. Расчетно-экспериментальное исследование воспламенения двухфазной топливной композиции воздух + этанол в резонансной газодинамической системе // *Физика горения и взрыва*. 2017. Т. 53. № 4. С. 34–42.

## References

1. Kalugin K.S., Sukhov A.V. Methane application specifics as a fuel for liquid rocket engines. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 120–132.
2. Baklanov A.V. Application of multi-flame combustion in combustion chamber to increase the gas combustion efficiency. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 88–94. DOI: 10.34759/vst-2022-2-88-94
3. Zubrilin I.A., Didenko A.A., Dmitriev D.N., Gurakov N.I., Hernandez Morales M. Combustion process effect on the swirled flow structure behind a burner of the gas turbine engine combustion chamber. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 3, pp. 124–136.
4. Voronetskii A.V., Makarov D.V., Skibin A.P. et al. *Matematicheskoe modelirovanie*, 1999, vol. 11, no. 4, pp. 29–36.
5. Aver'kov I.S., Aleksandrov V.Yu., Aref'ev K.Yu. et al. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2016, vol. 54, no. 6, pp. 939–949. DOI: 10.7868/S0040364416050045
6. Bartlma F. *Gasdynamik der Verbrennung*. Wien, Springer-Verlag, 1975, 247 p.
7. Nechaev Yu.N., Fedorov R.M., Kotovskii V.N. *Teoriya aviatsionnykh dvigatelei. V 2kh chastyakh* (Theory of aircraft engines. In 2 parts), Moscow, VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2006, (366 + 448) p.
8. Albegov R.V., Vinogradov V.A., Shikhman Yu.M. *Fizika goreniya i vzryva*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 18–29. DOI: 10.1134/S0010508216010020
9. Arefyev K.Yu., Krikunova A.I., Panov V.A. Complex Effect of Electric and Acoustic Fields on Air–methane Flame Blow-off Characteristics. *High Temperature*, 2019, vol. 57, no. 6, pp. 909–915. DOI: 10.1134/S0018151X19060026
10. Yu M., Zheng K., Zheng L. et al. Effects of hydrogen addition on propagation characteristics of premixed methane/air flames. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, vol. 34, pp. 1–9.
11. Grishin I., Zakharov V., Aref'ev K. Experimental Study of Methane Combustion Efficiency in a High-Enthalpy Oxygen-Containing Flow. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 2: 899. DOI: 10.3390/app12020899
12. Aref'ev K.Yu., Kukshinov N.V., Serpinski O.S. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2017, no. 5, pp. 90–102. DOI: 10.7868/S0568528117050103
13. Annushkin M.Yu. *Fizika goreniya i vzryva*, 1981, no. 4, pp. 59–71.
14. Beketaeva A.O., Naimanova A.Zh. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2011, vol. 52, no. 6(310), pp. 58–68.
15. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. *AIAA Journal*, 2009, vol. 47, no. 12, pp. 2894–2906. DOI: 10.2514/1.42362
16. Zakharov V.S., Gus'kov O.V., Prokhorov A.N., Berezhnoi V.N. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2021, no. 2, pp. 165–186.
17. Liou M.-S. A sequel to AUSM, Part II: AUSM+–up for all

- speeds. *Journal of Computational Physics*, 2006, vol. 214, no. 1, pp. 137-170. DOI: 10.1016/j.jcp.2005.09.020
18. Luan Y.-T., Chyou Y.-P., Wang T. Numerical Analysis of Gasification Performance via Finite-Rate Model in a Cross-Type Two-Stage Gasifier. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 57, no. 2, pp. 558-566. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.026
19. Xu C., Gao Y., Ren Z., Lu T. A Sparse Stiff Chemistry Solver Based on Dynamic Adaptive Integration for Efficient Combustion Simulation. *Combustion and Flame*, 2016, vol. 172, pp. 183-193. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.07.009
20. Aref'ev K.Yu., Voronetskii A.V., Il'chenko M.A., Suchkov S.A. *Fizika goreniya i vzryva*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 34-42.

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 20.11.2023.

The article was submitted on 09.10.2023; approved after reviewing on 20.11.2023; accepted for publication on 20.11.2023.