

тационным параметрам. Транспортный бизнес в России. Специальное издание.– Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 2003.

5. Королёв В.И., Таранин А.Г. Безвахтенное обслуживание судовых энергетических установок. Часть 1.– Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 2011.
6. Васьеви́ч Ф.А., Гордынский В.М. Оценка погрешности регулировки индикаторного привода главных. Специальная рабочая книга «Усовершенствование судовых энергетических установок и систем.– М.: Мортехинформреклама, 1991.
7. Королёв В.И., Таранин А.Г. Безвахтенное обслуживание судовых энергетических установок. Часть 2.– Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф.Ушакова, 2011.

References

1. Korolev V.I., Taranin A.G. Training of engineers on watch with usage of the engine room simulator. Part 1, Novorossiysk, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 2010.
2. Samoylenko A.Y. Indicator channel effect to the ship's diesel engines indication results, Transport

business in Russia, Special edition, Novorossiysk, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 2003.

3. Korolev V.I., Taranin A.G. Training of engineers on watch with usage of the engine room simulator. Part 2, Novorossiysk, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 2010.
4. Vasykevich F.A. Ship's diesel engines adjustment and synopsis by static operation data, Transport business in Russia, Special edition, Novorossiysk, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 2003.
5. Korolev V.I., Taranin A.G. Unattended machine service of a ship's power plant. Part 1, Novorossiysk, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 2011.
6. Vasykevich F.A., Gordynskiy V.M. Main diesel engine indicator driver adjustment inaccuracy estimation, Scientific work book «Ship's power plants and systems improvement», Moscow, Mortekhinformreklama, 1991.
7. Korolev V.I., Taranin A.G. Unattended machine service of a ship's power plant. Part 2, Novorossiysk, Admiral F.F. Ushakov State Maritime University, 2011.

УДК 629.735.33

DOI: 10.34046/aumsuomt93/19

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОРЕЖИМНОГО ГОРЕНИЯ В ТЕПЛОВЫХ МАШИНАХ

И.П. Бойчук, кандидат технических наук доцент

А.В. Амброжевич, доктор технических наук, профессор

К.В. Мигалин, кандидат технических наук

Численное исследование горения углеводородных топлив требует решения системы дифференциальных уравнений, описывающих многоступенчатые цепные химические реакции, молекулярный перенос, перенос импульса, тепла и массы путем конвекции, излучение, турбулентность, испарение жидких капель и т. д. В данной работе показан опыт численного моделирования горения на основе однородной модели, отображающей непрерывный спектр режимов горения - от диффузионных пламен и до детонации. Модель является составной частью аппаратных исследований нестационарных пространственных течений вязкой среды в разнообразных тепловых машинах. Течение газа описывается законами сохранения массы, импульса и энергии. Для отображения движения частиц химически реагирующей смеси с различной предысторией используется смешанный эйлерово-лагранжев подход. Идентификация положительных энергетических скачков, адекватных определенным уровням активации химических превращений, реализуется на основе дифференциальных анализаторов активации процесса. В работе приведены примеры расчета рабочего процесса в пульсирующем воздушно-реактивном двигателе.

Ключевые слова: многорежимное горение, численные исследования, тепловые машины, эйлерово - лагранжев подход, дифференциальный анализатор

A numerical study of the combustion of hydrocarbon fuel requires solving a system of differential equations. This describes multistage chain chemical reactions, molecular transfer, momentum transfer, heat and mass due to convection, radiation, turbulence, evaporation of liquid droplets, etc. In this paper we have the experience of numerical simulation of combustion based on a homogeneous model. This model displays a continuous spectrum of combustion modes - from diffusion flame to detonation. Knitted environment in a variety of heat engines. The gas flow is described by the laws of conservation of mass, momentum and energy. To display the motion of particles of a chemically reacting mixture with a different background, a mixed arbitrary Lagrangian - Eulerian method is used. The identification of positive energy surges is realized on the basis of differential process activation analyzers. In this case, energy jumps are adequate to certain levels of activation of chemical transformations. The paper gives examples of the calculation of the working process in a pulsejet engine.

Key words: multi regime combustion, numerical studies, heat machines, arbitrary lagrangian - eulerian, differential process activation analyzers

Введение

Кинетические модели химического взаимодействия компонентов топлив [1 и др.] описываются системами трансцендентных уравнений высокого порядка. Получение единичного результата на основе такого рода моделей для топлив типа «воздух-бензин» с условной формулой $C_\alpha H_\beta N_\gamma O_\delta$ общего вида представляет собой отдельную задачу высокой ресурсоемкости [2 – 4 и др.]. Не бесспорна также сама гипотеза квазиравновесности применительно к условиям процесса в двигателях с периодическими процессами, а значит и адекватность полученных на ее основе табулированных констант химического равновесия.

В таком контексте не выглядит морально устаревшим традиционный для общей теории тепловых двигателей подход, основанный на использовании эмпирических зависимостей типа известной формулы Вибе [5,6] или ЦНИДИ [7], представляющими собой специфические формы закона Аррениуса.

Модель горения

В представленной модели процесс сгорания имитируется с использованием формулы Вибе, обеспечивающей возможность параметрической адаптации к различным условиям горения углеводородных топлив.

Для отслеживания отдельных химически реагирующих частиц в потоке на фоне основной (эйлеровой) используется лагранжева система координат. Химически реагирующая частица с момента инициализации может сопровождаться посредством специального субстанционального признака («индивидуального времени» - \bar{t} , [8 – 10]). Диффузия \bar{t} , как и любого субстанционального признака, подчинена соответствующему уравнению переноса в системе уравнений [11]. Данный принцип вполне удовлетворителен в случаях, когда моделируемый процесс не связан с интенсивным слиянием химически реагирующих частиц с различной предысторией (т.е. отличающихся значениями \bar{t}). Из области применимости данного принципа выпадает класс задач пространственных течений с неоднородным полем предысторий химически реагирующих частиц при наличии интенсивных обменных процессов. Однако, если пространственная модель процесса в камере ПуВРД использует допущение о синхронном характере инициализации горения во

всем ее объеме, такой подход не вступает в противоречие с физикой процесса. Поле \bar{t} при этом будет постоянным, а частицы, не содержащие инициализированных исходных реагентов, благодаря принятому виду соответствующего уравнения переноса, останутся нейтральными по отношению к «горящим», т.е. не повлияют на собственные последним значения \bar{t} при слиянии.

В двигателях с самоподдерживающимся волновым характером рабочего процесса одним из важнейших факторов, влияющих на амплитудно-фазо-частотные характеристики, а также принципиальную осуществимость подобных тепловых машин на заданных видах горючего, являются условия самовоспламенения.

В представленной работе горение моделируется согласно [12].

Из общих представлений статистической физики по Больцману о механизме протекания химических реакций [13]:

$$\ln C = \pm k\bar{t} \quad (1)$$

где C – актуальная концентрация, k – коэффициент пропорциональности, \bar{t} – время превращения, следует уравнение Аррениуса [13]:

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (2)$$

где k_0 – коэффициент пропорциональности, характеризующий полное число столкновений молекул в единице объема реагирующей смеси, $e^{-E/RT}$ – доля полного числа столкновений, которые характеризуются энергией, достаточной для разрушения атомарных связей, E – энергия активации.

Представления (1) – (2) позволяют воспроизвести как механизм медленного горения – результат единичного низкоэнергетического столкновения двух молекул, так и быстрого (детонацию) – проявление высокоэнергетического столкновения молекул, при котором происходит не только единичное взаимодействие, но и передача импульса и энергии другим молекулам (цепная реакция как результат волнового процесса). Теми же выразительными средствами может быть описаны модели перехода горения в детонацию (ПГД) и предпламенных процессов.

Таким образом, механизм любой фазы (α) процесса сгорания (либо их совокупности) может быть выражен формулой Вибе в исходной или мо-

дифференциальной форме [14 – 16], которую следует рассматривать в качестве частного случая уравнения Аррениуса (2), универсально отображающей любые физико-химические превращения:

$$X(\bar{A}^\alpha) = \exp \left\{ \ln(1 - X_z^\alpha) \left(\frac{\bar{t}}{t_z^\alpha} \right)^{m^\alpha + 1} \right\}, \quad (3)$$

где $\bar{A}_\alpha = \{X_z, \bar{t}, t_z, m\}^\alpha$ – обобщенный параметрический вектор аргументов; X – доля выгоревшего топлива к моменту времени \bar{t} ; m – показатели характеристики фазы процесса; X_z – полнота сгорания; $t_z = 0,038 \frac{(1000L)^{0,97}}{1000[t]} C_z$ –

продолжительность сгорания; L – характерный линейный размер камеры сгорания, [м]; $[t]$ – эталон времени, [с]; C_z – параметр скорости горения, $\alpha \equiv pf, o$ – предпламенная и основная фазы.

На основании (3) устанавливается зависимость конечной концентрации продуктов сгорания от параметризации отдельных фаз процесса сгорания:

$$X(\bar{t}) = 1 - n^{pf} X(\bar{A}^{pf}) - (1 - n^{pf}) X(\bar{A}^o) \quad (4)$$

где n^{pf} – массовая доля топлива, окисляющегося в предпламенных процессах.

Метод решения газодинамической задачи

Математическое описание движения воздуха в расчетной области основывается на консервативной форме записи системы уравнений пространственного течения в декартовых координатах, состоящей из уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial x_1} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial x_2} + \frac{\partial \bar{H}}{\partial x_3} = \bar{\Delta}_1 + \bar{\Delta}_2, \quad (5)$$

где $\bar{U} = [\rho, \rho\omega, \rho\omega_r, \rho\omega_r\bar{t}, \rho\omega_r\sigma, \rho w_1, \rho w_2, \rho w_3, \rho \epsilon^o]^\Gamma$,

$\bar{F} = [\rho w_1, \rho w_1\omega, \rho w_1\omega_r, \rho w_1\omega_r\bar{t}, \rho w_1\omega_r\sigma, \rho w_1^2 + p, \rho w_2 w_1, \rho w_3 w_1, \rho w_1 i^o]^\Gamma$,

$\bar{G} = [\rho w_2, \rho w_2\omega, \rho w_2\omega_r, \rho w_2\omega_r\bar{t}, \rho w_2\omega_r\sigma, \rho w_1 w_2, \rho w_2^2 + p, \rho w_2 w_3, \rho w_2 i^o]^\Gamma$,

$\bar{H} = [\rho w_3, \rho w_3\omega, \rho w_3\omega_r, \rho w_3\omega_r\bar{t}, \rho w_3\omega_r\sigma, \rho w_1 w_3, \rho w_2 w_3, \rho w_3^2 + p, \rho w_3 i^o]^\Gamma$,

ρ – плотность, x_1, x_2, x_3 – пространственные координаты; p – давление; w_1, w_2, w_3 – компоненты вектора скорости; $\epsilon, i, \epsilon^o, i^o$ – внутренняя энергия и энтальпия, по статическим параметрам и полные; ω, ω_r – массовые концентрации продуктов сгорания и исходных реагентов; \bar{t} – индивидуальное время химически реагирующей частицы; σ – скоростной фактор реакции горения; $\bar{\Delta}_n, n = 1, 2$ – группы особенностей (источники-стоки, ИС) соответствующих параметров, «свободные» и обусловленные субстанциональным переносом.

Условия однозначности решения системы (5) состоят из краевых условий, термического и калорического уравнений состояния, соотношений определяющих интенсивности особенностей.

В качестве универсального подхода к решению уравнений газодинамического процесса используется принцип декомпозиции [17]. Подсистема (5), учитывающая только изменения «автономного» течения

$$\left[\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \right]_0 = \bar{\Lambda}_0, \quad (6)$$

имеет гиперболический тип, а изменчивость течения

$$\left[\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \right]_n = \bar{\Lambda}_n \quad (7)$$

трактуются как возмущение основного решения (6). Таким образом, приращение локальной производной представляет собой линейную форму, образуемую совокупностью факторов «автономного» течения и групп ИС:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = \left[\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \right]_0 + \sum_{n=1}^M \left[\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} \right]_n, \quad (8)$$

где $M = M_C + M_M$ – общее число воздействующих факторов. Это позволяет использовать для решения системы уравнений (8) принцип расщепления по физическим процессам для отдельных факторов $0 \dots M$ [17].

Для решения подсистемы уравнений Эйлера (6) применяется конечно-разностная модифицированная для граничных ячеек расчетной подобласти схема С.К. Годунова на регулярной временной сетке [18]. По этой схеме интенсивности обменных процессов между ячейками находятся из решения задачи о распаде разрыва. На непроницаемых границах используется решение задачи о взаимодействии однородного потока газа с преградой. Обе задачи отвечают условиям сплошности среды. На границе расчетной области конвективные потоки находятся из изоэнтропного решения для римановой волны разряжения-сжатия.

Сеточное отображение топологических свойств расчетной области задается двумя типами масок: поверхностной, имитирующей непроницаемости границ ячеек, и твердотельной, воспроизводящей элементы конструкции, исключенные из области решения краевой задачи. Расчетная область, с исключенной из геометрической подобласти решения твердотельной маской, покрывается сеткой с гексаэдральными ячейками.

Для обеспечения адекватного отображения направляющих свойств поверхностей твердых тел на относительно грубых сетках предложена специальная маска направляющих косинусов. Для построения маски используется изоэнтропическая модель взаимодействия, учитывающая, что поверхностные силы не совершают работы в системе отсчета, связанной с обтекаемым объектом. Модель оперирует представлением о силовом воздействии на лагранжеву частицу, которая из начального положения по истечении малого промежутка времени приобретает заданное направление движения. Данная модель позволяет найти вектор скорости с учетом поворота потока, что дает возможность далее определить давление и температуру [19].

Для генерации поверхностной маски и маски направляющих свойств в среде проектирования и их импорта в языки программирования высокого уровня, разработан специальный пакет программ [20].

Для реализации численного эксперимента на языке FORTRAN разработано программное обеспечение, позволяющее производить обмен данными с инженерными пакетами (SolidWorks).

Визуализация физических полей осуществляется путем отображения фазовых срезов расчетной области. Отображение срезов физических полей осуществляется в виде цветовой кодировки значения физической величины, полученной с помощью передаточной функции, ставящей в соответствие значение величину или набор величин цвету в цветовом пространстве. Наиболее адекватной формой отображения результатов численного эксперимента представляется воспроизведение переменных во времени состояний физических полей согласно соответствующим траекторным фазам.

Дифференциальные анализаторы активации процесса

Математическое отображение реализуемости условия преодоления потенциального барьера предполагает идентификацию положительных энергетических скачков, адекватных определенным уровням активации химических превращений.

Использование сеточных методов неизбежно приводит к «размазыванию» фронта разрыва – ударной волны либо температурного скачка. В таком случае зона разрыва может быть идентифицирована по наличию контрастных значений локальных производных удельных энергий или градиентов температур [21, с.125]:

$$\frac{\partial \varepsilon(\bar{x}, t)}{\partial t} \cong c_v \frac{\partial T(\bar{x}, t)}{\partial t}, \quad (9)$$

где c_v – удельная теплоемкость процесса, т.е. с точностью до примерно постоянного множителя.

Тем самым достигается возможность простой формализации процесса идентификации актуальных локализаций зон разрывов на основе дифференциальных анализаторов [22, 23]:

$$\frac{T_{i_1, i_2, i_3}^{l+1} - T_{i_1, i_2, i_3}^l}{\tau^l} \cong \frac{\partial T(\bar{x}_{i_1, i_2, i_3}, t^{l+1})}{\partial t}, \quad (10)$$

$\tau^l \equiv \Delta t$

что позволяет на фоне культивируемого численного метода [24] реализовать вышеизложенный

принцип идентификации энергетических скачков. Для этого необходимы ассоциативные оценки пороговых энергий инициализации $\left(\frac{\partial \Gamma}{\partial t}\right)_{extr}$ альтернативных режимов горения. Установление факта инициализации определенного режима сгорания сводится к реализуемости условия:

$$\frac{T_{i_1, i_2, i_3}^{1+1} - T_{i_1, i_2, i_3}^1}{\tau^1} \geq \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial t}\right)_{extr} \quad (11)$$

Принципы построения лагранжевой системы координат в модели химически реагирующей среды

Нестационарный характер, неоднородности в пространстве, в химической кинетике и по режимам горения не могут быть смоделированы с достаточной для решения задач проектирования полнотой в рамках эйлеровой точки зрения. В связи с этим для отображения движения частиц химически реагирующей смеси с различной предысторией применяется специальная лагранжева система координат (рис. 1) [12]. Кинетика

химической реакции, ассоциированная с отдельно взятой частицей среды, определяется ее индивидуальным временем, отсчитываемым с момента начала реакции ($\bar{t}_{...}$), на основании формулы Вибе (3) с учетом сопутствующих обменных процессов.

Построенный на такого рода принципе метод расчета с использованием смешанной (эйлерово–лагранжевой) системы координат [12] в общих чертах напоминает известный метод «крупных частиц» Белоцерковского–Давыдова [25]. Однако, в отличие от методов «частиц» [25, 26], эйлерово–лагранжева точка зрения привлекается только на шаге отображения кинетики [21, 27 и др.]. Шаги расщепления, отображающие обменные процессы, как результат действия динамических факторов в пределах эйлеровых объемов, и вызванные ими явления переноса массы, импульса и энергии (т.е. соответствующая деформация лагранжевой сетки), реализуются в обычных рамках метода интегро–интерполяции.

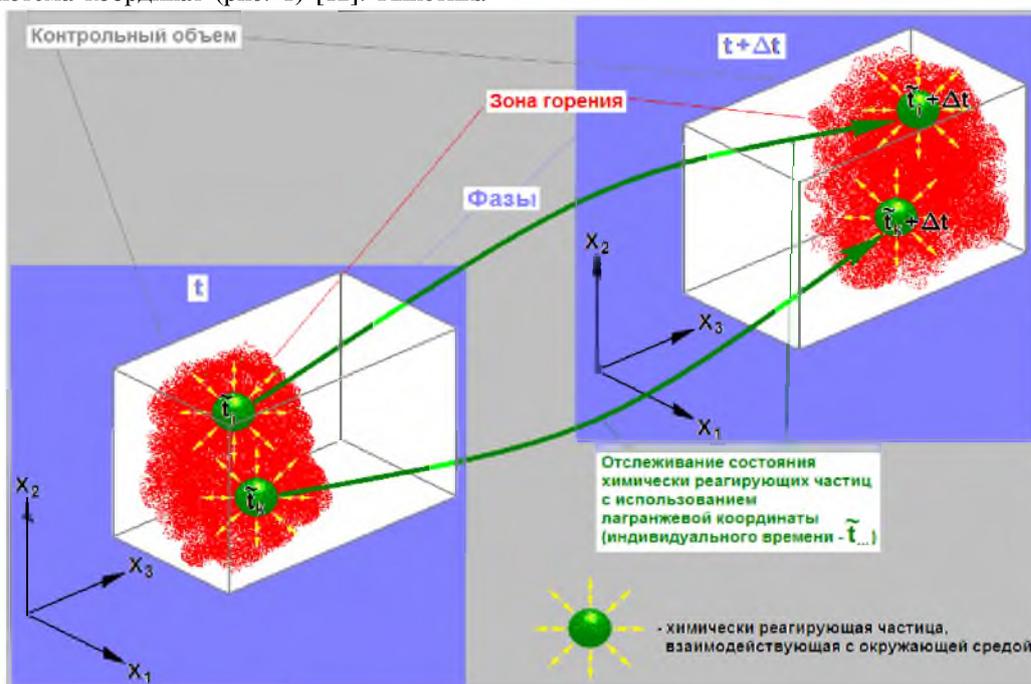


Рисунок 1 – Эволюционная модель химически реагирующей среды с различной предысторией активных частиц [12]

Примеры применения

В качестве объекта исследования выбран эжекторный прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ЭПВД) [28, 29]. Расчетная область с моделью двигателя и сеточным отображением твердых тел представлена на рис. 2. Моделировалась работа двигателя от момента запуска до выхода на устойчивый режим.

В тракте двигателя наблюдается низкоскоростные неустановившиеся течения с сильной завихренностью (рис. 3). В процессе движения по тракту реактивной трубы развиваются прижатые к боковым зонам парные вихри (рис. 4), вызывающие соответствующее смещение линий тока основного (не завихренного) течения (рис. 5).

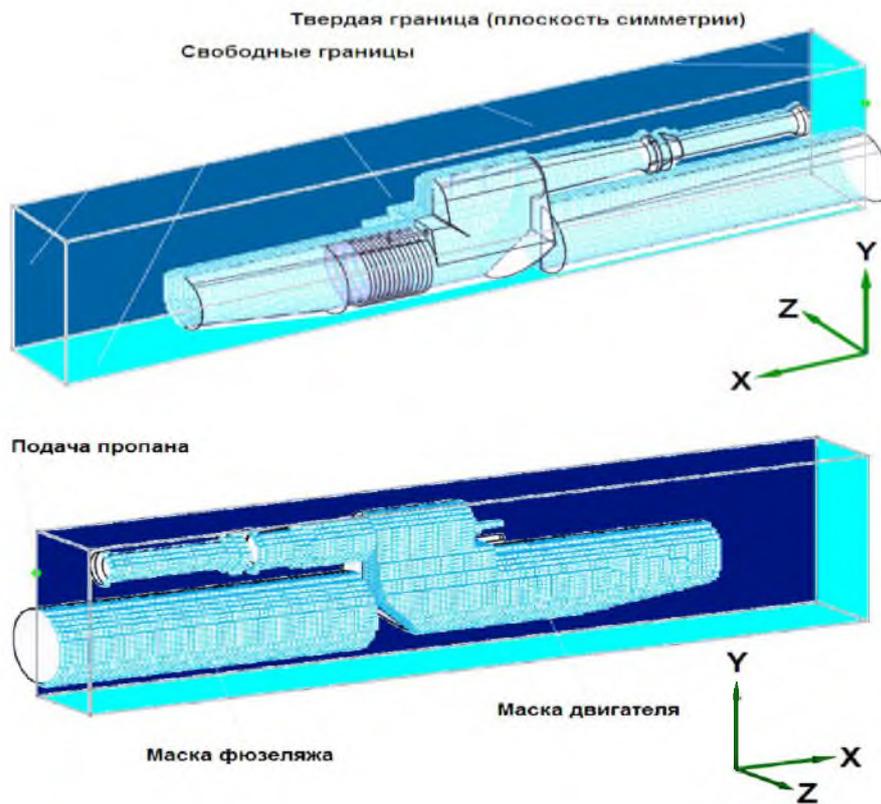


Рисунок 2 – Расчетная область с сеточным отображением ЭПВРД «ДМ-ХІ» с разрешением $N_x \times N_y \times N_z = 170 \times 40 \times 20$ ячеек

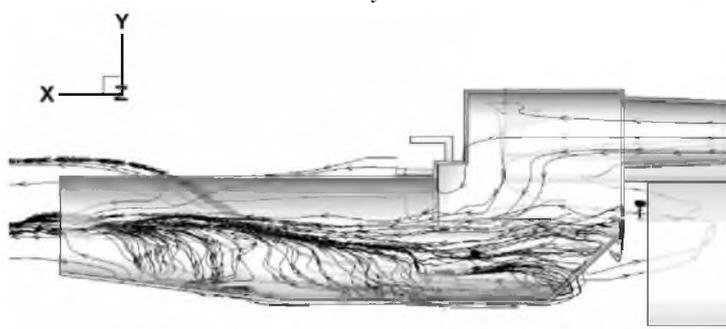


Рисунок 3 – Линии тока в двигателе

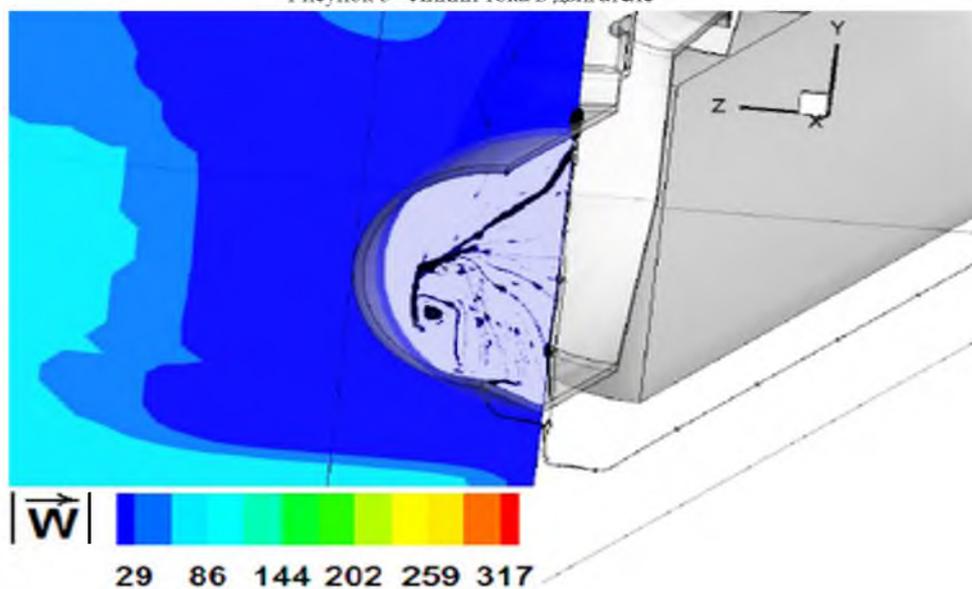
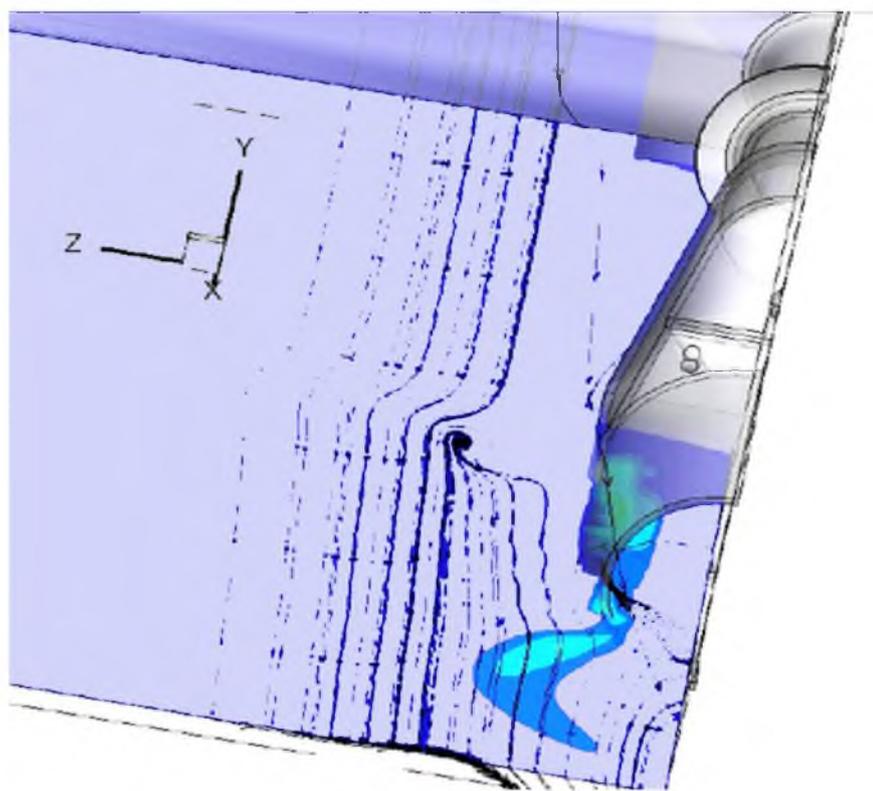
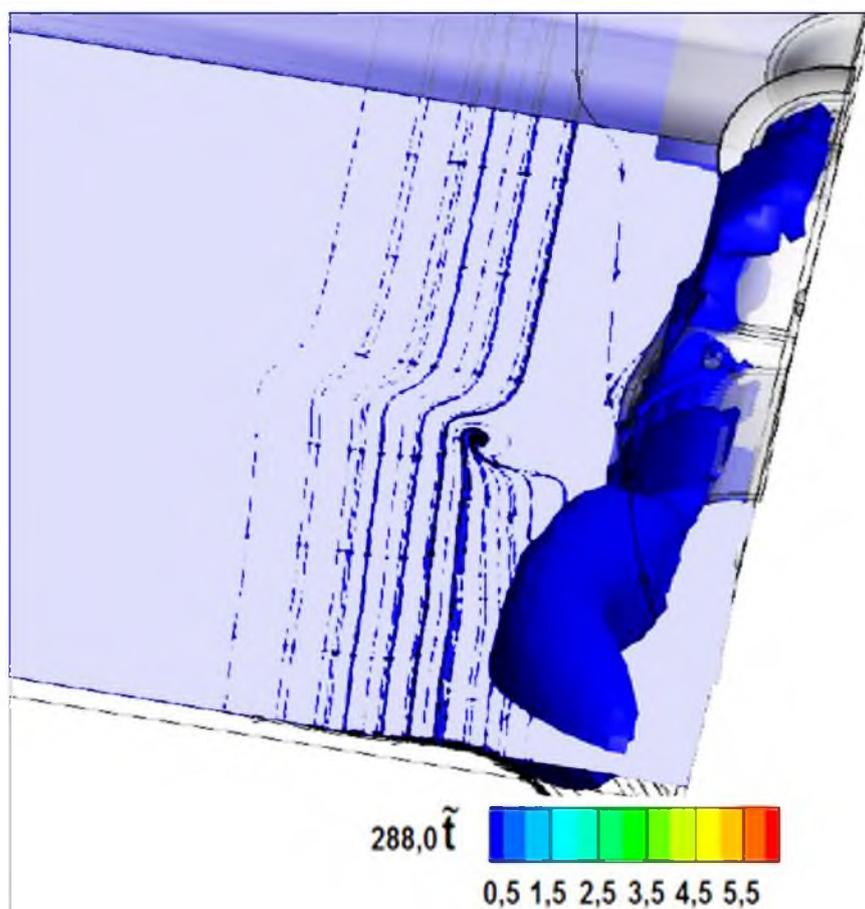


Рисунок 4 – Поле скоростей и линии тока в зоне левого парного вихря в реактивной трубе



а)



б)

Рисунок 5 –Отклонение зоны горения в левом парном вихревом жгуте:
а) – поле температур, б) – изоповерхность завихренности

На рис. 6 отображены неустойчивый характер и нерегулярные формы зон горения. Некоторая регулизирующая роль в процессе движения газовой смеси по тракту реактивной трубы

принадлежит упоминавшимся парным вихрям, обуславливающим раздвоение зоны горения под действием центробежных сил после выхода струи из сопла.

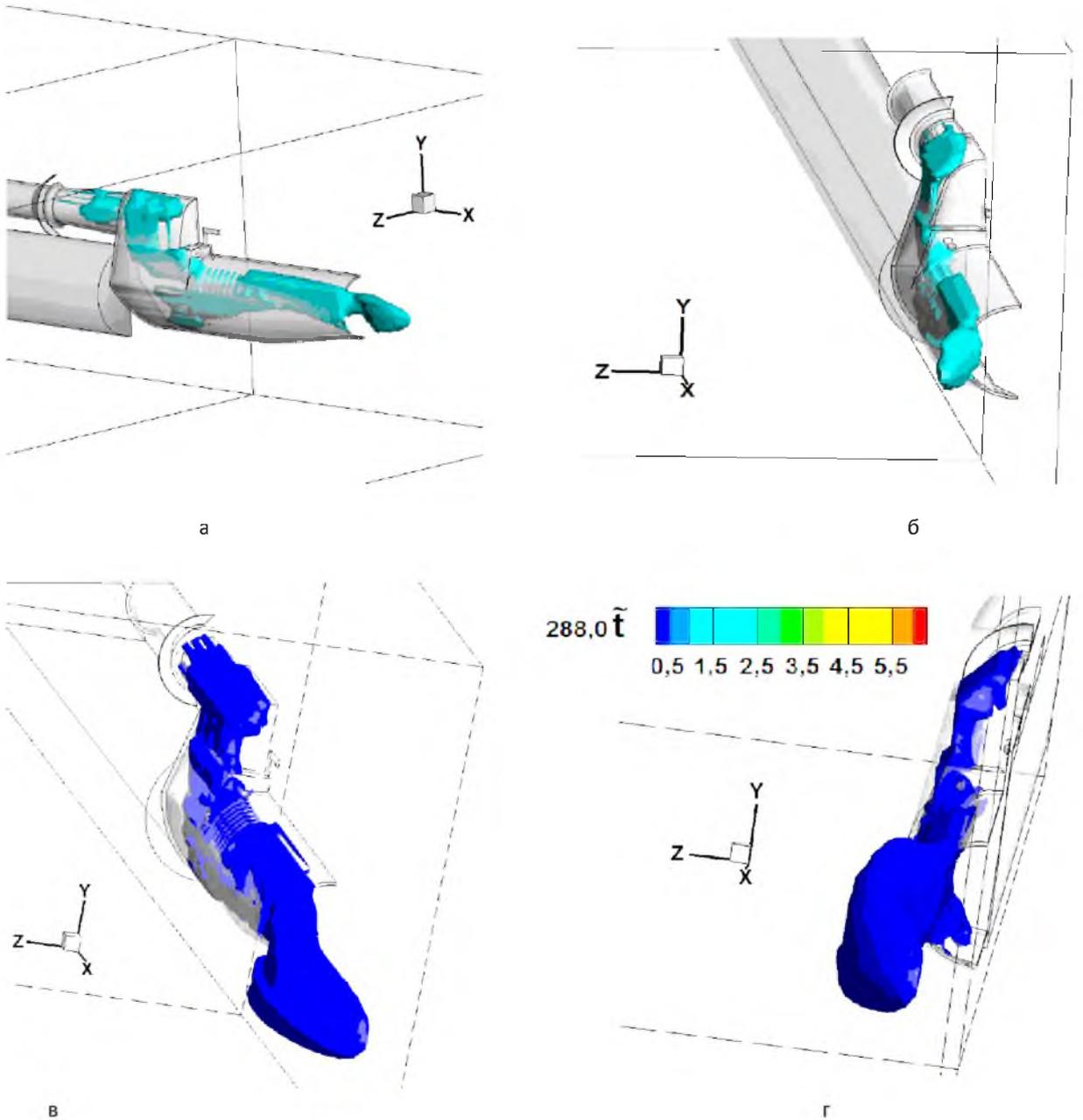
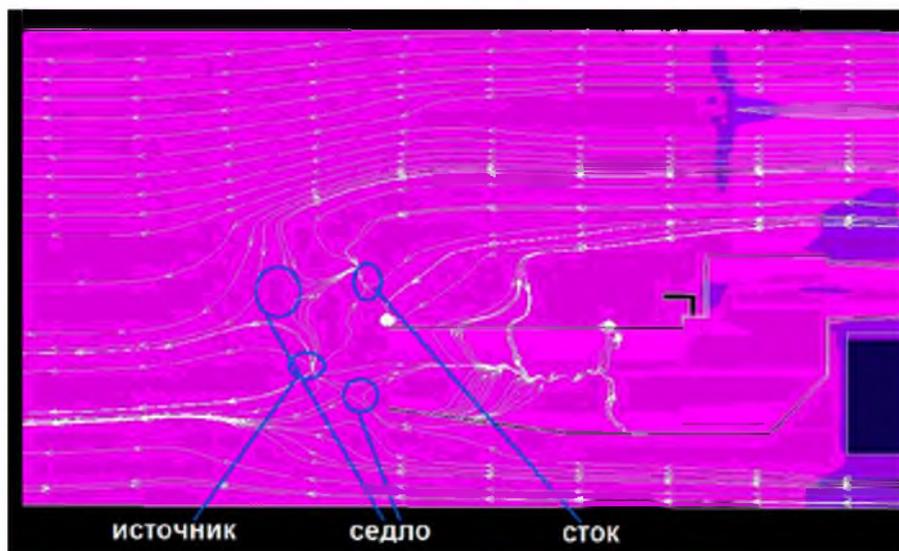


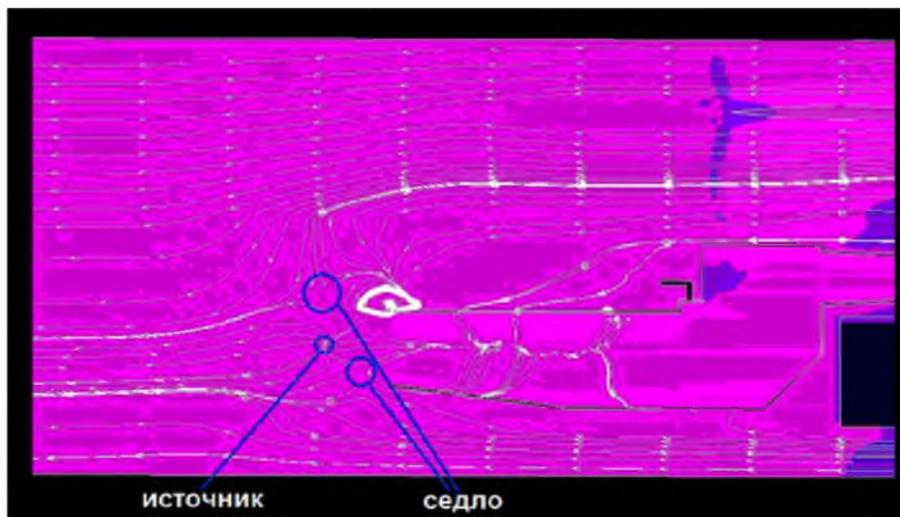
Рисунок 6 – Исоповерхности фаз горения и их смещение под действием центробежных сил после выхода струи из сопла: а, б –ранние стадии, в, г –поздние

Взаимодействие реактивной струи с внешним потоком приводит к появлению особых точек поля скоростей. Наличие особых точек (тройных, рис. 7) с позиций гидромеханики можно объяснить лишь локальным торможением до практического нуля скорости (рис. 8). Низкоуровневые течения не имеют стационарного характера, о чем

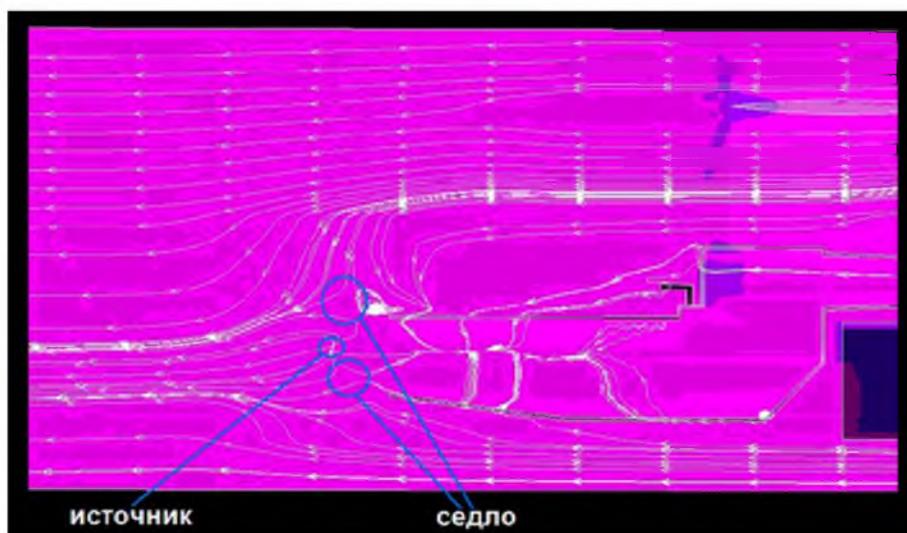
свидетельствует эволюция особых точек поля скоростей (рис. 7, а-г). При этом в области за двигателем наблюдается образование структур вида «источник», «сток» и «седло», что, по-видимому, связано с нестационарными процессами истечения из двигателя.



а)



б)



в)

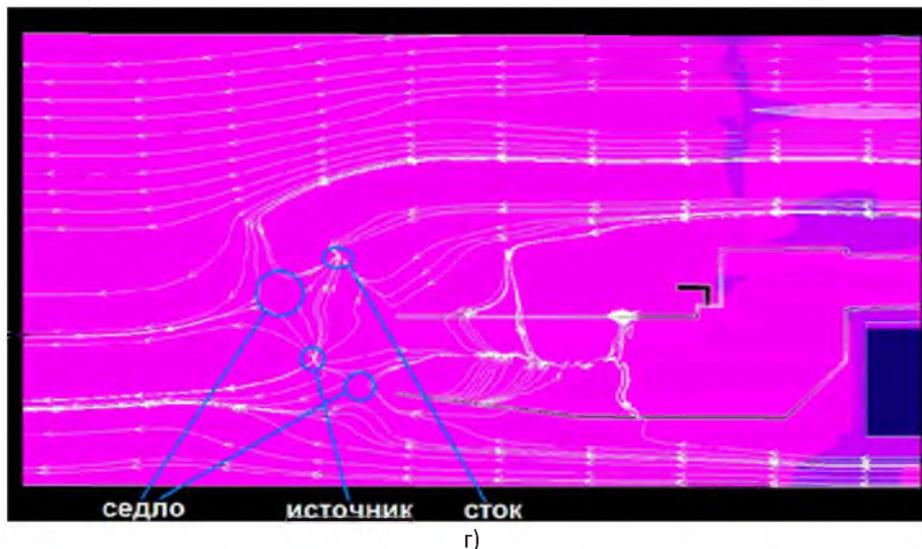


Рисунок 7 –Эволюция особых точек поля скоростей

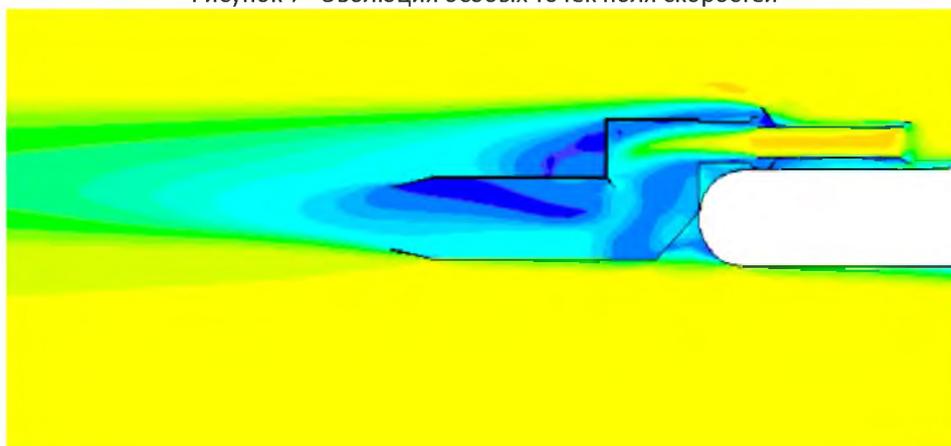


Рисунок 8 – Поле скоростей в расчетной области

Заключение

Комплексные газотермодинамические модели течений в тракте двигателя и вне его отображают свойственную физическому оригиналу взаимосвязь доминирующих факторов и вследствие этого обеспечивают бесспорное преимущество над традиционно используемыми в практике подходами, основывающимися на принципе декомпозиции. Модифицированная модель горения, входящая в комплексную модель, способна благодаря использованию полей индивидуальных времен химически реагирующих частиц адекватно отобразить процесс генерации и развития многорежимных пламен. Данная модель может быть применена для исследования рабочих процессов различных типов тепловых машин с периодическим и постоянным рабочим процессом [30]. Представленные результаты дают необходимый, но не исчерпывающий набор данных для комплексного газодинамического проектирования тепловых машин.

Литература

1. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник в 10 т./ Под ред. В.П. Глушко. Т.I – М.: ВИНТИАН СССР, 1971.
2. Westbrook C.K. A detailed chemical kinetic reaction mechanism for the oxidation of iso-octane and n-heptane over an extended temperature range and its application to analysis of engine knock. / C.K. Westbrook, J. Warnatz, W.J.Pitz.Symposium (International) on Combustion. Volume 22, Issue 1, 1989, Pages 893-901.
3. Kong S.C. Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed Chemical Kinetics with Multidimensional CFD/ Kong S.C., Martini S.D. etc. SAE 2001-01-1026.
4. Acevs S.V. A Decoupled Model of Detailed Fluid Mechanics Followed by Detailed Chemical Kinetics for Prediction of Iso-Octane HCCI Combustion/ Acevs S.V., Martines-Frias J. etc. SAE 2001-01-3612.
5. Двигатели внутреннего сгорания /под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова.– М.: «Машиностроение», 1983. –375 с.

6. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях/А.Н. Воинов. – М.: Машиностроение, 1977.—277 с.
7. Дизели. Справочник /под ред. Ваншейдта. – М.-Л.: Машиностроение, 1964.– 559 с.
8. Амброжевич А.В. Численное моделирование комплекса нестационарных газодинамических процессов в тепловых двигателях/ А.В. Амброжевич. — Харьков: ХГАДТУ, 1999.– 77 с.
9. Амброжевич А.В. Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении/ А.В. Амброжевич. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», –2005. –233 с.
10. Амброжевич А.В. Комплексная математическая модель ПуВРД малой тяги [Текст]/ А.В. Амброжевич, С.Н. Ларьков // Радіоелектронні і комп'ютерні системи: Науково-технічний журнал Харків: ХАІ.– 2004.– № 4. – С.118-121.
11. Бойчук И. П. Комплексное аэродинамическое моделирование транспортных систем с двигателями прямой реакции: монография / И. П. Бойчук. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. — 230 с.
12. Амброжевич А.В. Модель многорежимного горения в тепловых машинах/ А.В. Амброжевич, С.Н. Ларьков, К.Н. Мигалин // Авиационно-космическая техника и технология, Вып. 1 (58), – 2010. С. 76– 79.
13. Кнорре Г.Ф. Что такое горение? –М. –Л.: Госэнергоиздат, 1955. –233 с.
14. Livengood, J.C., Wu, P.C. Correlation of Autoignition Phenomena in Internal Combustion Engines and Rapid Compression Machines. Fifth Symposium on Combustion, 1955.
15. Jinkai Zheng, David L. Miller and Nicolas P. Gernansky. A Global Reaction Model for the HCCI Combustion Process. SAE Paper № 2004-01-2950.
16. Watson, N., Pilley, A.D., and Marzouk, M., “A Combustion Correlation for Diesel Engine Simulation”, SAE Paper № 800029.
17. Ковеня В. М. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики//В. М. Ковеня, Г. А. Тарнавский, С. Г. Черный. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1990. – 247 с.
18. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики// С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
19. Boychuk I.P., Grinek A.V., Dantsevich I.M. Modified method of calculation of the flows in areas with moving boundaries. Proceedings of the 2018 IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW). 10-14 September, 2018. St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, pp.19-21.
20. Бойчук И.П., Ларьков С.Н. Генератор регулярных ортогональных сеток для численного решения задач газодинамики // Морские интеллектуальные технологии (в печати).
21. Льюис Б. Горение, пламя и взрывы в газах/ Б. Льюис, Г. Эльбе.–М.: «Мир», 1968. –592 с.
22. Ворожцов Е.В. Дифференциальные анализаторы ударных волн. Приложения теории/ Е.В. Ворожцов, В.М. Фомин, Н.Н. Яненко// Численные методы механики сплошной среды, т.7. – 1976. -№ 6. -С.8-22.
23. Ворожцов Е.В. Метод локализации особенностей при численном решении задач газовой динамики/ Е.В.Ворожцов, Н.Н. Яненко. - Новосибирск: Наука, 1985. -224 с.
24. Амброжевич А.В. Малоресурсный метод численного моделирования течений в геометрических областях сложной формы/А.В. Амброжевич, И.П.Бойчук, С.Н.Ларьков, В.А. Середа // Авиационно- космическая техника и технология.– 2008.– Вып. 6.– С. 5-10.
25. Белоцерковский О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике/ О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов.– М.: Наука, 1982. – 392 с.
26. Харлоу Ф. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики// Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967, – С.316-342.
27. Детонация и двухфазное течение / Сб. ст. под ред. С.С.Пеннера и Ф.А. Уильямса. –М.: «Мир», 1966, –374 с.
28. Пат. 2435978 (РФ) Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель / К.В. Мигалин, А.И.Сиденко, К.К. Мигалин, С.И. Мусатов.– Ужегов, 2010.
29. Амброжевич А.В. Численные исследования комплекса процессов внешнего и внутреннего обтекания беспилотного летательного аппарата с эжекторным ПВРД / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук, К.В. Мигалин, В.А. Середа // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012.– № 1.– С. 34-39.
30. Кондратьев С.И. Гидродинамика управляемого движения судна [Учебное пособие] С. И. Кондратьева, Р. А. Починков; Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Морская гос. акад. им. адмирала Ф. Ф. Ушакова". Новороссийск, 2008.

References

1. Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya. Spravochnik v 10 t.[Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products. Handbook of 10 t.] Moscow, 1971.
2. Westbrook C.K. A detailed chemical kinetic reaction mechanism for the oxidation of iso-octane and n-heptane over an extended temperature range and its application to analysis of engine knock. / С.К. Westbrook, J. Warnatz, W.J. Pitz. Symposium (International) on Combustion. Volume 22, Issue 1, 1989, Pages 893-901.
3. Kong S.C. Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed Chemical Kinetics with Multidimensional CFD/ Kong S.C., Mariott S.D. etc. SAE 2001-01-1026.
4. Acevs S.V. A Decoupled Model of Detailed Fluid

- Mechanics Followed by Detailed Chemical Kinetics for Prediction of Iso-Octane HCCI Combustion/ Acevs S.V., Martines-Frias J. etc. SAE 2001-01-3612.
5. Orlin A.S., Kruglov M.G. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [Internal combustion engines], Moscow, 1971. 375 p.
 6. Voinov A.N. Sgoranie v bystrokhodnykh porshnevnykh dvigatelyakh [Combustion in high speed piston engines], Moscow, 1977. 277 p.
 7. Dizeli. Spravochnik [Diesels. Reference book], Moscow, 1964. 559 p.
 8. Ambrozhevich A.V. Chislennoe modelirovanie teplofizicheskikh processov v dvigatelestroenii (Numerical modeling of a complex of non-stationary gas-dynamic processes in thermal engines). Har'kov, 1999. 77 p.
 9. Ambrozhevich A.V. Chislennoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov v dvigatelestroenii [Numerical modeling of thermophysical processes in engine building]. Har'kov, 2005. 233 p.
 10. Ambrozhevich A.V. & Lar'kov S.N. (2004) Kompleksnaya matematicheskaya model' PuVRD maloy tyagi. Radioelektronnyy komp'yuternyy sistem [Integrated mathematical model of low thrust pulsejet]. 4. 118-121.
 11. Boychuk I.P. Kompleksnoe aerodinamicheskoe modelirovanie transportnykh sistem s dvigatel'nykh priamoj reakcii (Complex aerodynamic modeling of transport systems with direct reaction engines), Belgorod, 2016. 229
 13. Knorre G.F. Chto takoe gorenie? [What is combustion?], 1955. 233 h.
 14. Livengood J.C., Wu P.C. Correlation of Autoignition Phenomena in Internal Combustion Engines and Rapid Compression Machines. Fifth Symposium on Combustion, 1955.
 15. Jinkai Zheng, David L. Miller and Nicolas P. Germansky. A Global Reaction Model for the HCCI Combustion Process. SAE Paper № 2004-01-2950.
 16. Watson, N., Pille, A.D., and Marzouk, M., "A Combustion Correlation for Diesel Engine Simulation", SAE Paper № 800029.
 19. Boychuk I.P., Grinek A.V., Dantsevich I.M. Modified method of calculation of the flows in areas with moving boundaries. Proceedings of the 2018 IEEE Northwest Russia Conference on Mathematical Methods in Engineering and Technology (MMET NW). 10-14 September, 2018. St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", pp.19-21.
 20. Boychuk I.P., Lar'kov S.N. (2019) Generator regulyarnykh ortogonal'nykh setok dlya chislennogo resheniya zadach gazodinamiki. Morskie intelektual'nye tekhnologii [Mesh generator for numerical simulations gas-dynamics problems].
 21. L'yuis B., El'be G. Gorenie, plama i vzryvy v gazakh [Горение, пламя и взрывы в газах], 1968. 592 p.
 22. Vorozhtsov E.V., Fomin V.M., Yanenko N.N. (1976) Differentsial'nye analizatory udarnykh voln. Prilozheniya teorii. Chislennyye metody mekhaniki sploshnoy sredy [Differential shock wave analyzers. Theory applications]. 6. 8-22.
 23. Vorozhtsov E.V., Yanenko N.N. Metod lokalizatsii osobennostey pri chislennom reshenii zadach gazovoy dinamiki [The method of localization of features in the numerical solution of gas dynamics problems], Novosibirsk: Nauka, 1985. 224 p.
 24. Ambrozhevich A.V., Boychuk I.P., Lar'kov S.N., Sereda V.A. (2008). Maloresurnyy metod chislennogo modelirovaniya techeniy v geometricheskikh oblastyah slozhnoy formy. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya (Short-life the method of numerical modelling of currents in geometrical areas of the complex form). 6. 5-10.
 25. Belotserkovskiy O.M., Davydov Yu.M. Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike [The method of large particles in gas dynamics], Moscow: Nauka, 1982. 392 p.
 26. Kharlou F. (1967) Chislennyy metod chastits v yacheykakh dlya zadach gidrodinamiki. Vychislitel'nye metody v gidrodinamike [The numerical method of particles in cells for hydrodynamic problems]. 316-342.
 27. Penner S.S., Uilyams F.A. Detonatsiya i dvukhfaznoe techenie [Detonation and two-phase flow], Moscow: Mir, 1966. 374 p.
 28. Pat. 2435978 (RF) K.V. Migalin, A.I. Sidenko, K.K. Migalin, S.I. Musatov, P.N. Uzhegov (2010) Pul'siruyushchiy vozdušno-reaktivnyy dvigatel' [Pulsejet engine].
 29. Ambrozhevich A.V., Boychuk I.P., Migalin K.V., Sereda V.A. (2012) Chislennyye issledovaniya kompleksa protsessov vneshnego i vnutrennego obtekaniya bespilotnogo letatel'nogo apparata s ezhektornym PVRD. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya [Numerical researches of the complex processes of external and internal flowing around of unmanned aerial vehicle with ejector air jet engine]. 1. 34-39.
 30. Kondrat'ev S.I. Gidrodinamika upravlyаемого dvizheniya sudna [Uchebnoe posobie] S. I. Kondrat'eva, R. A. Pochinkov; Federal'noe gos. obrazovatel'noe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya "Morskaya gos. akad. im. admirala F. F. Ushakova". Novorossiysk, 2008.