

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ТЯГИ ДЕТОНАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

Представлены некоторые результаты численного моделирования процесса детонации газовых компонентов топлива в камере сгорания импульсного детонационного реактивного двигателя (детонационной камере). Анализ полученных данных позволяет более обоснованно подходить к проблеме выбора способа организации рабочего процесса в детонационной камере двигателя. Решение указанной проблемы является важным и необходимым этапом на пути создания детонационного двигателя с повышенными характеристиками.

Надано деякі результати чисельного моделювання процесу детонації газових компонентів палива у камері згорання імпульсного детонаційного реактивного двигуна (детонаційній камері). Аналіз отриманих даних дозволяє більш обґрунтовано підходити до проблеми вибору способу організації робочого процесу у детонаційній камері двигуна. Розв'язання зазначеної проблеми є важливим та необхідним етапом на шляху створення детонаційного двигуна з підвищеними характеристиками.

Some results of a numerical simulation of knocking the propellant gas components in the combustion chamber of the impulse knock rocket engine (the knock chamber) are presented. An analysis of the simulation results obtained makes possible to choose a way of organizing the work process in the engine knock chamber. The solution of this problem is an important and a necessary stage of the knock engine development with higher performance.

Одной из наиболее трудных и важных проблем, с которыми сталкиваются разработчики детонационных двигателей (ДД), является проблема выбора способа организации рабочего процесса. Трудность решения этой проблемы связана со сложным и неоднозначным характером процессов, происходящих в элементах двигателя. Влияние многочисленных определяющих режимных факторов и конструктивных параметров на важнейшие характеристики двигателя трудно поддается учету и в значительной степени обусловлено самим способом организации рабочего процесса. Наиболее естественным представляется инициирование детонации близкой к стехиометрическому составу топливной смеси во входном сечении детонационной камеры (ДК). При указанном способе организации рабочего процесса воздействие продуктов детонации (ПД) практически мгновенно передается тяговой стенке камеры, возле которой в течение достаточного длительного периода времени существует область покоящегося газа с давлением, равным давлению в точке Чепмена–Жуге. Именно такому способу уделяется наибольшее внимание исследователей.

Интегральным показателем эффективности ДК при работе двигателя в режиме одиночных пульсаций является удельный импульс тяги I_{sp} , величина которого определяется в [1] как отношение импульса тяги в течение одного цикла I_{cycle} к массе топливной смеси, способной к детонации:

$$I_{sp} = \frac{I_{cycle}}{\rho_1 L_0 F_k}, \quad (1)$$

где I_{cycle} – импульс тяги, создаваемый цилиндрической ДК постоянного поперечного сечения; ρ_1 – плотность топливной смеси до начала инициирования детонации; L_0 , F_k – длина и площадь поперечного сечения ДК.

Значение I_{cycle} получают интегрированием разности давлений $p_w - p_1$ по торцевой поверхности ДК за время t_{exh} , в течение которого давление на стенке ДК в месте приложения основной составляющей вектора тяги (на тяговой стенке ДК) p_w превышает давление окружающей среды p_1 :

© А.Е. Золотько, Н.Д. Коваленко, Ю.И. Мороз, 2010

$$I_{\text{cycle}} = F_k \int_0^{t_{\text{exh}}} (p_w - p_1) dt . \quad (2)$$

Для расчета удельного импульса тяги ракетных двигателей обычно используется расчетная зависимость, основанная на использовании параметров потока в выходном сечении камеры [2]:

$$I_{\text{sp}}^R = u_a + \frac{F_a}{\dot{m}_a} (p_a - p_1), \quad (3)$$

где p_a , ρ_a , u_a – давление, плотность и скорость потока на выходе из ДК; $\dot{m} = \rho_a u_a F_a$ – расход газа; F_a – площадь выходного сечения ДК.

В [1] с помощью формул (1) и (2) были получены расчетные данные о зависимости I_{sp} от значения начального давления, начальной температуры топливной смеси, коэффициента избытка окислителя и некоторых других параметров для случая инициирования детонации во входном сечении камеры. Возможность использования расчетной зависимости (3) и оценка влияния расположения источника инициирования детонации в выходном сечении ДК на величину I_{sp} в этой и других известных работах по ДД не рассматривались.

Рассмотрение различных схем организации рабочего процесса в ДК проведено на основе детального изучения механизма распространения детонационных и ударных волн. После инициирования детонации во входном сечении ДК по направлению к выходу из камеры начинает распространяться в нормальном режиме (режиме Чепмена – Жуге) волна детонации. Следом за волной детонации движется непосредственно примыкающая к ней центрированная волна разрежения (волна Тейлора). В момент времени достижения фронтом детонационной волны (ДВ) выходного сечения камеры, в противоположном направлении начинает распространяться вторичная волна разрежения, под действием которой ПД постепенно удаляются из ДК. Вторичная волна разрежения вначале распространяется по первичной волне, пересекает ее, а затем продолжает свое движение в области, занятой однородным покоящимся газом. При инициировании детонации в выходном сечении ДК ДВ распространяется в направлении, противоположном направлению истечения ПД из камеры. По достижении фронтом детонационной волны стенки ДК происходит его отражение. В результате по ПД в обратном направлении (к выходу из ДК) начинает распространяться ударная волна (УВ). В процессе расширения ПД, движущихся вслед за фронтом УВ в направлении к выходу из ДК, правая граница расчетной области определяется параметрами ударного фронта. Поскольку эти параметры изменяются в процессе движения УВ, их расчет должен выполняться на каждом временном слое разностной сетки. Фронт УВ является поверхностью разрыва. При детонации рассматриваемых в настоящем исследовании газовых смесей имеет место такой случай распада произвольного разрыва, при котором в направлении, противоположном направлению движения УВ, то есть в сторону стенки ДК, распространяется волна разрежения.

Математическое моделирование рассматриваемых детонационных течений требует учета достаточно малых осцилляций физического характера, которые можно выделить, используя разностные схемы повышенного порядка точности. В настоящей работе для решения одномерных уравнений Эйлера используется явная консервативная конечно-разностная схема второго поряд-

ка по пространству и времени с подавлением ложных осцилляций, возникающих при пространственной дискретизации областей с ударными волнами, разрывами сплошности и значительными градиентами функций решения. При вычислении разностных аналогов характеристических переменных применяются монотонизирующие ограничители с логическими переключателями, зависящими от свойств численных решений. Ограничители вступают в действие (включаются) в тот момент, когда происходит резкое, скачкообразное изменение формы профиля фронта волны. При этом схема отвечает двум основным требованиям: неубыванию энтропии и невозрастанию во времени полных вариаций сеточных аналогов характеристических переменных. Реализация последнего требования практически означает построение разностной схемы класса TVD (Total Variation Diminishing) [3].

На рис. 1 и 2 представлены результаты вычислительного эксперимента по детонации кислородно-водородной смеси стехиометрического состава в ДК цилиндрического типа постоянного проходного сечения. На рис. 1 показано распределение давления, плотности и скорости ПД топливной смеси H_2-O_2 стехиометрического состава вдоль ДК в момент выхода фронта ДВ в окружающую среду для двух случаев инициирования детонации: во входном сечении ДК (сплошные линии 1) и в ее выходном сечении (пунктирные линии 2). Видно, что скорость ПД в ДК линейно уменьшается с удалением от фронта ДВ. При инициировании детонации во входном сечении начиная с середины ДК продукты детонации будут покоиться относительно стенок камеры. В случае инициирования детонации в выходном сечении скорость ПД посередине ДК изменит знак. Давление и плотность до середины длины камеры при инициировании детонации во входном сечении ДК постоянны и монотонно возрастают на второй половине длины камеры. В случае инициирования детонации в выходном сечении ДК в момент выхода фронта ДВ в окружающую среду давление и плотность вдоль камеры плавно увеличиваются по всей ее длине. В развитии процесса, изображенного на рис. 2, выделяются три стадии. Первая стадия определяется распространением по топливной смеси нормальной ДВ, сформированной в выходном сечении ДК. При отражении фронта ДВ от стенки ДК по ПД в обратном направлении, т.е. к выходу из ДК, начинается движение УВ переменной интенсивности (вторая стадия). Скорость отраженной УВ, в отличие от скорости движения волны детонации, переменна во времени. В момент выхода фронта УВ в окружающее пространство в ДК устанавливается течение с монотонно изменяющимися параметрами состояния (третья стадия процесса).

На рис. 3 и 4 показано изменение во времени давления у тяговой стенки ДК при инициировании детонации во входном и выходном сечениях камеры для различных топливных смесей стехиометрического состава. Из сопоставления данных, приведенных на этих рисунках, видно, что место расположения устройства инициирования детонации оказывает существенное влияние как на величину давления у тяговой стенки ДК, так и на характер его изменения во времени. На рис. 5 показаны расчетные зависимости удельного импульса тяги от скорости нормальной детонации D_{CJ} пяти кислородно-углеводородных газовых смесей стехиометрического состава для двух случаев

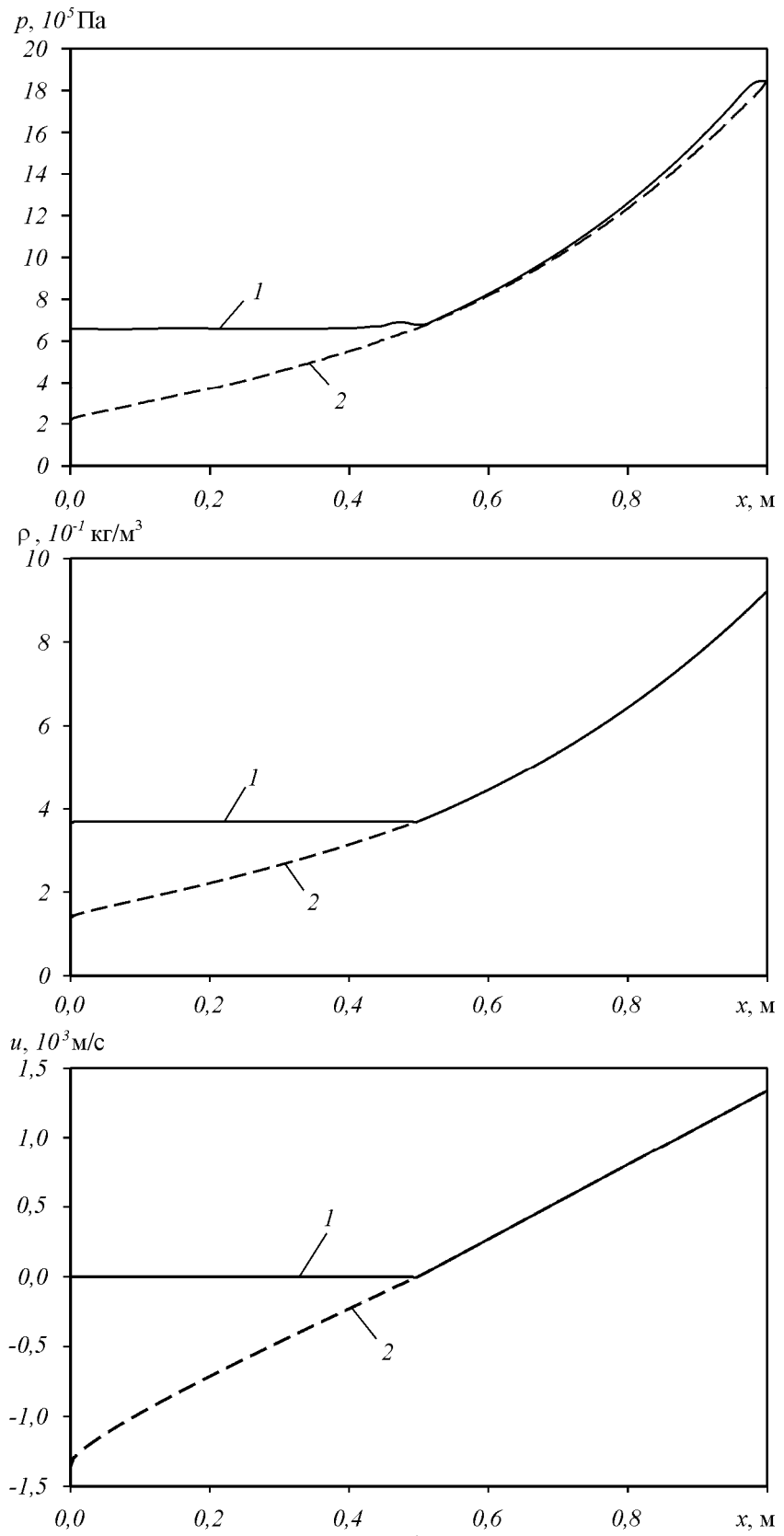


Рис. 1

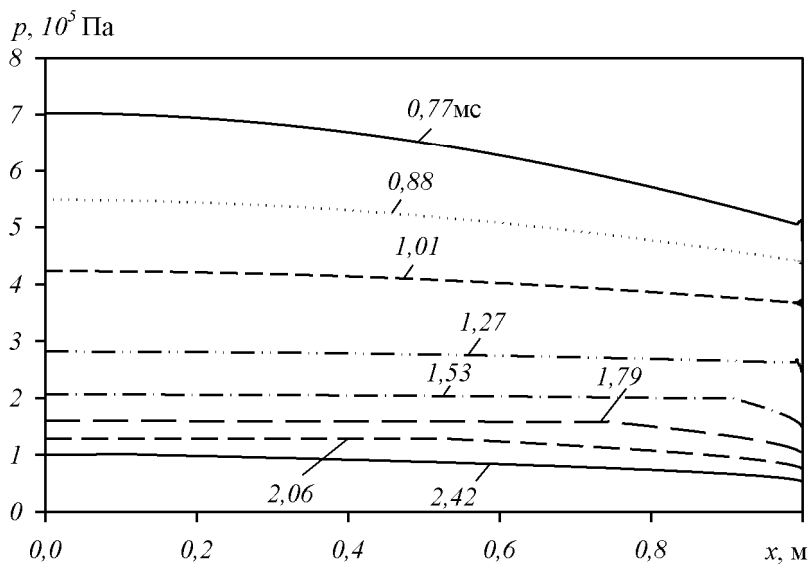
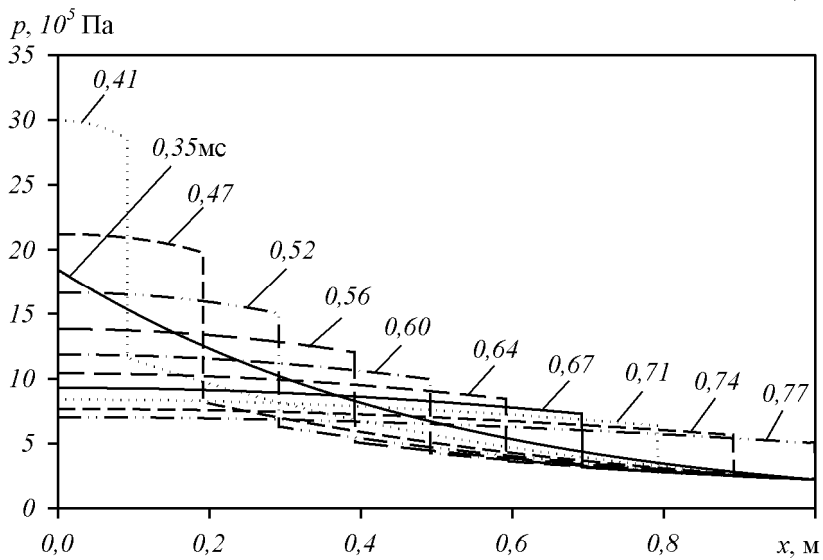
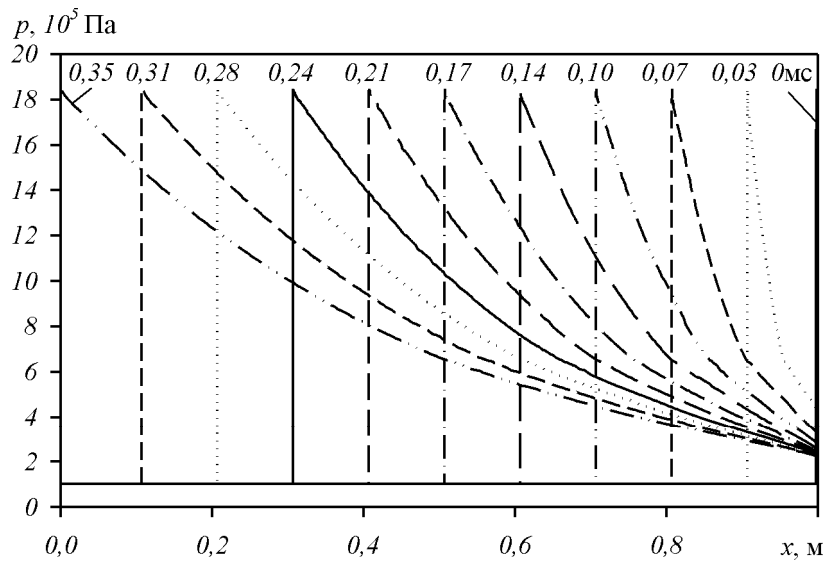


Рис. 2

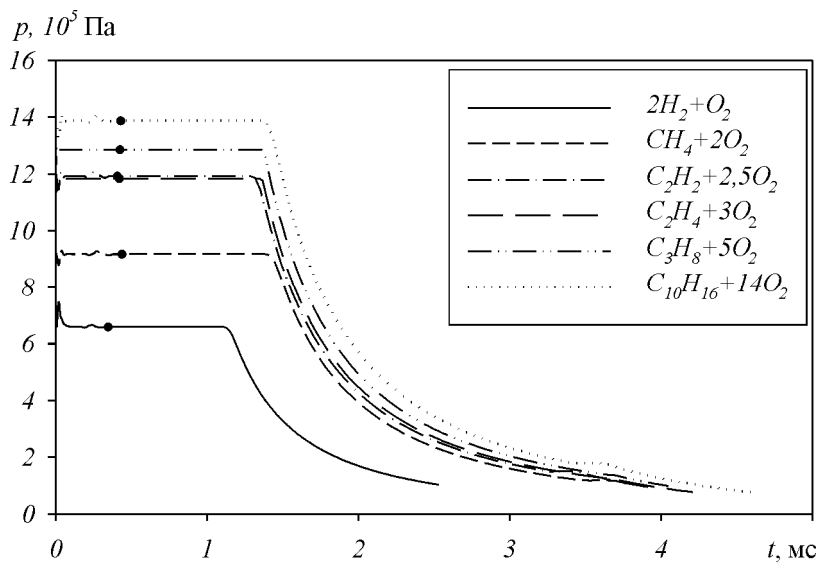


Рис. 3

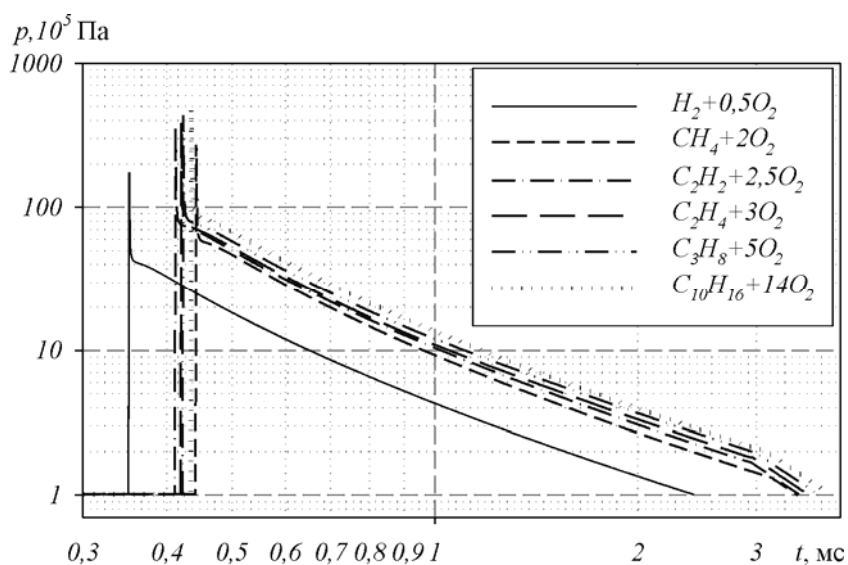


Рис. 4

иницирования детонации. Расчетам по формулам (1) и (2) соответствуют сплошная 1 (иницирование во входном сечении) и штрихпунктирная 4 (иницирование в выходном сечении) линии. Расчетам по формуле (3) на этом рисунке соответствуют пунктирная 2 (иницирование во входном сечении) и пунктирно-двухточечная 3 (иницирование в выходном сечении) линии. Там же нанесены экспериментальные значения удельного импульса тяги, полученные в работе [4].

Из анализа рис. 5 следует, что в обоих случаях представленные зависимости близки к линейным. Расхождение в расчетных данных, полученных по формулам (1) и (3), находится в пределах погрешности вычислений. В случае инициирования детонации в выходном сечении ДК значения удельного импульса тяги получаются на 10 – 12 % большими, чем при инициировании детонации во входном сечении. Отметим, что при детонации кислородно-

этиленовой смеси наблюдается хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных (расхождение менее 2 %). Для кислородно-ацетиленовой смеси расхождение между опытными данными и результатами численных расчетов составляет около 20 %. Указанное расхождение объясняется существованием аномальных режимов детонационного сжигания кислородно-ацетиленовых смесей. Аномальность заключается в том, что для этих смесей максимальный тепловой эффект химической реакции, определяющий скорость детонации, не соответствует стехиометрическому составу [5].

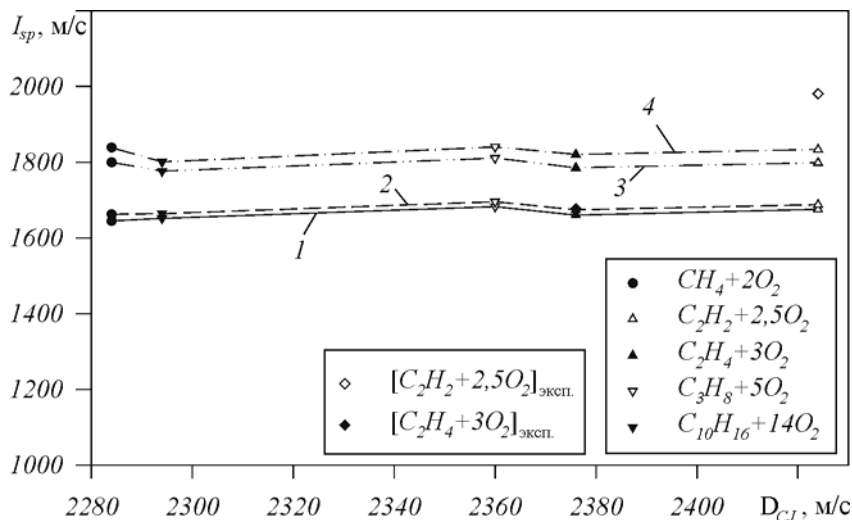


Рис. 5

На рис. 6 показана зависимость удельного импульса тяги от содержания водорода в газовой смеси. Расчетам по формуле (1) на рисунке соответствуют линии 1 (иницирование детонации во входном сечении) и 4 (иницирование в выходном сечении), а расчетам по формуле (3) – линии 2 (иницирование детонации во входном сечении) и 3 (иницирование в выходном сечении). Отметим практически полное совпадение расчетных и экспериментальных данных [4] для кислородно-водородной смеси стехиометрического состава. Рост содержания водорода в кислородно-водородной топливной смеси приводит к монотонному возрастанию величины удельного импульса тяги вплоть до достижения верхнего концентрационного предела детонации (около 90 об. % водорода в смеси с кислородом). Так, при увеличении количества молей водорода, приходящихся на один моль кислорода, в 2,5 раза (сравниваются данные по смесям, отмеченным на рис. 6 четырехугольниками) наблюдается возрастание удельного импульса тяги примерно в 1,2 раза.

Из сравнения данных, представленных на рис. 5 и 6, следует, что для топливных смесей стехиометрического состава удельный импульс тяги ДК при использовании водорода оказывается на 12 – 14 % выше, чем при использовании углеводородного горючего. Причем, во всех случаях инициирование детонации в выходном, а не во входном сечении ДК, обеспечивает дополнительное увеличение удельного импульса тяги на 10 – 12 %.

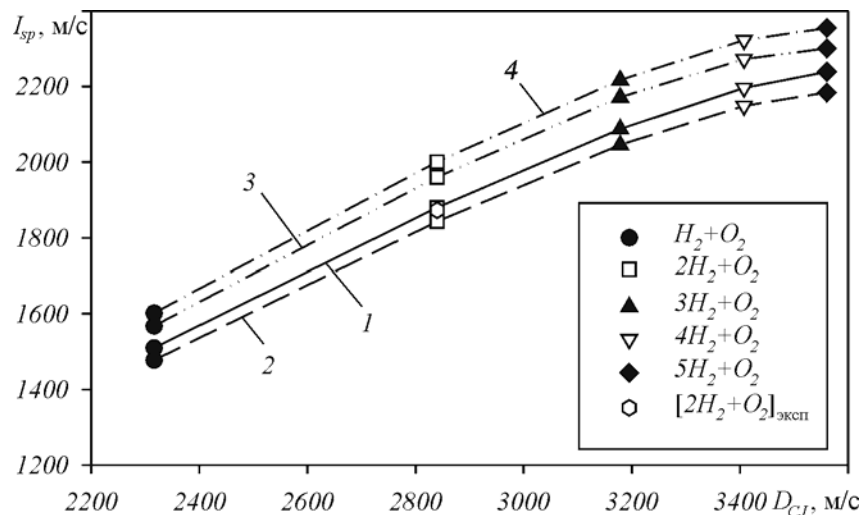


Рис. 6

В ходе настоящего исследования было установлено, что использование переобогащенной горючим кислородно-водородной топливной смеси и инициирование детонации в выходном сечении ДК может привести к увеличению удельного импульса тяги примерно на 30 – 40 %. Таким образом, альтернативный способ организации рабочего процесса в двигателе содержит потенциальную возможность существенного повышения удельного импульса тяги ДРД. Полученные результаты позволяют сформулировать задачи дальнейших исследований: обеспечение работоспособности конструкции в условиях высокого давления в ДК и повышенного содержания водорода в газовой смеси; синхронизация времени заполнения объема ДК топливной смесью со временем включения устройства инициирования детонации; организация работы двигателя в режиме одиночных и связанных импульсов и некоторые другие.

1. Wintenberger E. An analytical model for the impulse of a single-cycle pulse detonation tube / E. Wintenberger, J. M. Austin, M. Cooper, S. Jackson, J. E. Shepherd // Journal of Propulsion and Power. – 2003. – Vol. 19. – P. 22 – 38.
2. Кудрявцев В. М. Основы теории и расчета ЖРД / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов и др. – М. : Высш. шк. – 1983. – 703 с.
3. Harten A. High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws / A. Harten // J. Comput. Phys. – 1983. – Vol. 49. – P. 357 – 293.
4. Zitoun R. Propulsive performances of pulsed detonations / R. Zitoun, D. Desbordes // Combustion Science and Technology. – 1999. – Vol. 144. – P. 93 – 114.
5. Шоршоров М. Х. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий / М. Х. Шоршоров, Ю. А. Харламов. – М. : Наука. – 1978. – 227 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 28.07.09,
в окончательном варианте 15.09.09