УДК 621.454.2 https://doi.org/10.15407/itm2020.01.005

О. В. ПИЛИПЕНКО, С. И. ДОЛГОПОЛОВ, А. Д. НИКОЛАЕВ, Н. В. ХОРЯК

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПУСКА МНОГОДВИГАТЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: dolmrut@gmail.com

Вимоги щодо зниження вартості, термінів розробки і виробництва рідинних ракетних двигунів (РРД) часто приводять до рішення використовувати в маршових рідинних ракетних двигунних установках (РРДУ) ракет-носіїв в'язку декількох двигунів, відпрацьованих автономно. Це відкриває перспективи забезпечення необхідної тяги маршових РРДУ за рахунок включення у в'язку необхідної кількості двигунів. При використанні маршових РРДУ, до складу яких входить кілька двигунів, виникають додаткові проблеми, пов'язані з неодночасним вступом двигунів в роботу. Ця неодночасність може порушити роботу окремих РРД, які вступають в роботу з затримкою, або створити перекидальний момент при відриві ракети від пускового столу. Мета цієї роботи – дослідження динамічних процесів при запуску багатодвигунної РРДУ, яка складається з чотирьох РРД із допалюванням окислювального генераторного газу, з урахуванням можливості їхнього неодночасного вступу в роботу. Розроблено математичну модель і проведено розрахунки запуску даної багатодвигунної РРДУ. Показано, що на відміну від випадку, коли усі двигуни двигунної установки вступають в роботу одночасно, при наявності зміщень моменту початку запуску двигунів є можливими глибокі затяжні провали витрати палива на вході в двигуни, які супроводжуються глибокими затяжними провалами тиску на вході в двигуни. Ці явища здатні викликати кавітаційний зрив одного або декількох насосів, що може порушити роботу всієї двигунної установки і призвести до аварійної ситуації. Результати математичного моделювання запуску багатодвигунної РРДУ, виконаного для двигунної установки, що розглядвється, показали, що характер і ступінь впливу зміщення початку запуску двигунів РРДУ на перехідні процеси залежить від безлічі факторів, які визначаються складом РРДУ, її динамічними характеристиками, умовами запуску та ін. Тому для підвищення надійності запуску багатодвигунних РРДУ необхідно в кожному конкретному випадку – для кожної нової або модернізованої РРДУ чи ракети-носія – проводити числові дослідження перехідних процесів при запуску з урахуванням різночасності вступу двигунів в роботу.

Ключові слова: *рідинний ракетний двигун, низькочастотні динамічні процеси, запуск, кавітація в насосах*, система живлення, неодночасність запуску.

Требования снижения стоимости, сроков разработки и производства жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) часто приводит к решению использовать в маршевых жидкостных ракетных двигательных установках (ЖРДУ) ракет-носителей связки нескольких двигателей, отработанных автономно. Это открывает перспективы обеспечить требуемую тягу маршевой ЖРДУ за счет включения в связку необходимого количества двигателей. При использовании маршевых ЖРДУ, в состав которых входит несколько двигателей, возникают дополнительные проблемы, связанные с неодновременным вступлением двигателей в работу. Эта неодновременность может нарушить работу отдельных ЖРД, вступающих в работу с задержкой, или создать опрокидывающий момент при отрыве ракеты от пускового стола. Цель настоящей работы – исследование динамических процессов при запуске многодвигательной ЖРДУ, состоящей из четырех ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа, с учетом возможности неодновременного вступления двигателей в работу. Разработана математическая модель и проведены расчеты запуска рассматриваемой многодвигательной ЖРДУ. Показано, что в отличие от случая, когда все двигатели двигательной установки вступают в работу одновременно, при наличии смещений момента начала запуска двигателей возможны глубокие затяжные провалы расхода топлива на входе в двигатели, сопровождающиеся глубокими затяжными провалами давления на входе в двигатели. Эти явления способны вызвать кавитационный срыв одного или нескольких насосов, что может нарушить работу всей двигательной установки и привести к аварийной ситуации. Результаты математического моделирования запуска многодвигательной ЖРДУ, проведенного для рассматриваемой двигательной установки, показали, что характер и степень влияния возможных смещений начала запуска двигателей ЖРДУ на переходные процессы зависят от множества факторов, определяемых составом ЖРДУ, ее динамическими характеристиками, условиями запуска и т. д. Поэтому для повышения надежности запуска многодвигательных ЖРДУ необходимо в каждом конкретном случае – для каждой новой или модернизированной ЖРДУ и ракеты-носителя – проводить численные исследования переходных процессов при запуске с учетом разновременности вступления двигателей в работу.

Ключевые слова: *жидкостной ракетный двигатель, низкочастотные динамические процессы, запуск, кавитация в насосах, система питания, неодновременность запуска.*

The need for a lower cost and a shorter time of liquid-propellant rocket engine (LPRE) development and production often leads to the decision to use bundles of multiple engines developed individually in launch vehicles' sustainer liquid-propellant rocket propulsion systems (LPRPSs). This opens up prospects for providing a

© О. В. Пилипенко, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк, 2020

desired thrust by including the necessary number of engines in the bundle. Using sustainer LPRPSs with multiple engines causes additional problems due to the fact that the engines start nonsimultaneously. This may disrupt the operation of engines that start with a delay or produce an overturning moment when rocket detaches from the launcher. The aim of this paper is to study dymanic processes at the start of a multiengine LPRPS with four LPREs with oxidizing generator gas afterburning with account for the possibility of the engines starting nonsimultaneously. The paper presents a mathematical model of the start of the multiengine LPRPS under consideration and the results of calculations by the model. It is shown that, as distinct from all the engines starting simultaneously, their nonsimultaneous start may result in deep prolonged dips in the propellant flow rate accompanied by deep prolonged dips in the pressure at the engine inlets. This may cause cavitation stall in one or more pumps, which may disrupt the operation of the whole of the propulsion system and result in an emergency. The results of mathematical simulation of the four-engine LPRPS start show that the character and degree of the effect of possible engine start delays on transients depend on a variety of factors governed by the LPRPS composition and dynamic performance, start conditions, etc. Because of this, for multiengine LPRPS start reliability to be improved, in each particular case, i.e., for each new or upgraded LPRPS and launch vehicle, start transients should be studied numerically with account for a nonsimultaneous start of the LPRPS engines.

Keywords: *liquid-propellant rocket engine, low-frequency dynamic processes, start, pump cavitation, feed system, nonsimultaneous start.*

Введение. Запуск является одним из наиболее ответственных и сложных режимов работы жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [1, 2]. Отказ маршевого двигателя в этот период работы может привести не только к невыполнению поставленной перед ракетой-носителем (РН) задачи, но также к разрушению двигателя и даже стартового стола. Передовые технологии моделирования (пакеты прикладных программ) и современные математические модели динамических процессов в системах ЖРД (например, [3] и [4]) позволяют получить надежный теоретический прогноз переходных процессов в двигателе. Эти технологии базируются на использовании термодинамических характеристик продуктов сгорания в газогенераторе и камере сгорания, полученных в результате работы специализированных компьютерных программ (таких как, например, ASTRA [5]).

В работе [1] представлены математические модели, позволяющие учесть кинетику воспламенения и выгорания топлива в газогенераторе и камере сгорания и различные теплофизические процессы, протекающие в топливном и газовом трактах двигателя на начальном этапе запуска. К этим процессам относятся нагрев и частичная газификация криогенных компонентов, отвод тепла от реагирующей смеси в элементы конструкции, двухфазные течения и др. Математическая модель низкочастотных процессов в регуляторах расхода, представленная в [1, 6], может быть использована для выполнения анализа устойчивости двигателя по отношению к регуляторным колебаниям. В работе [7] разработаны методики математического моделирования высокочастотных колебаний продуктов сгорания в газовых трактах двигателя. Учет в современных математических моделях низкочастотной динамики ЖРД таких важных явлений и процессов, как кавитационные колебания в системе питания ЖРД и динамическое взаимодействие двигателей с гидравлическими системами, представлены в работах [8, 9].

Требования снижения стоимости, сроков разработки и производства ЖРД часто приводит к тому, что в маршевых жидкостных ракетных двигательных установках (ЖРДУ) ступеней ракет используются связки нескольких ЖРД, отработанных автономно. Использование таких связок открывает перспективы обеспечения требуемой тяги ЖРДУ ступени за счет включения в связку необходимого количества двигателей. К числу ракет-носителей, двигательные установки которых включают несколько ЖРД, относятся РН Союз, Falcon и другие, а также разрабатываемые в Украине РН «Циклон-4М» и «Маяк» [10]. Однако использование многодвигательных ЖРДУ, как и эксплуатация ракет с пакетной схемой компоновки ступеней, приводит к дополнительным проблемам, которые связаны с неодновременным вступлением в работу отдельных ЖРД, входящих в состав ЖРДУ. Эта неодновременность может нарушить работу отдельных ЖРД (например, двигателей, вступающих в работу с большой задержкой) из-за провалов давления в общей системе питания ЖРДУ или создать опрокидывающий момент при отрыве ракеты от пускового стола.

Разные многодвигательные ЖРДУ отличаются друг от друга составом, количеством и характеристиками используемых в них ЖРД, условиями их запуска, характеристиками систем питания и т. д. В силу этого у разных многодвигательных ЖРДУ взаимодействие двигателей и системы питания может по-разному влиять на переходные процессы при запуске. Указанный фактор необходимо учитывать при математическом моделировании запуска многодвигательных ЖРДУ для надежного теоретического прогноза переходных процессов. Следует также подчеркнуть, что эта задача требует своего решения при разработке новых и модернизации существующих многодвигательных ЖРДУ.

Целью настоящей работы является математическое моделирование и исследование динамических процессов при запуске многодвигательной ЖРДУ первой ступени РН, состоящей из четырех двигателей, с учетом возможности их неодновременного вступления в работу.

1 Объект математического моделирования. Исследование динамического взаимодействия нескольких ЖРД при запуске многодвигательной ЖРДУ выполнялось на примере маршевой ЖРДУ I ступени космической ракеты-носителя. Объектом исследования являлись динамические процессы в многодвигательной ЖРДУ, состоящей из четырех одинаковых ЖРД с общей системой питания, при запуске, предметом исследования – влияние неодновременного вступления в работу двигателей рассматриваемой многодвигательной ЖРДУ на переходные процессы при запуске.

Предполагалось, что двигатели, входящие в состав ЖРДУ, выполнены по схеме с дожиганием генераторного газа, компоненты топлива – жидкий кислород и керосин. Питание двигателей окислителем из бака осуществляется по общей магистральной трубе длиной около 7 м, которая стыкуется с коллектором. От коллектора идут трубопроводы на каждый двигатель. Длина трубопровода от коллектора до входа в двигатель составляет 3 м, а от входа в двигатель до входа в бустерный насос окислителя (БНО) – 2 м. Трубопроводы от коллектора до входа в БНО (т. е. непосредственно до входа в двигатель) имеют довольно большую протяженность, в силу чего могут оказывать существенное влияние на низкочастотную динамику двигательной установки, особенно, как будет показано далее, при неодновременном вступлении в работу четырех двигателей.

Упрощенная схема ЖРД, входящих в состав рассматриваемой ЖРДУ, представлена на рис. 1.

2 Математическая модель низкочастотной динамики ЖРДУ. При построении нелинейной математической модели низкочастотной динамики рассматриваемой ЖРДУ использовались результаты многолетних наработок авторов по математическому моделированию динамических процессов во всех основных системах и агрегатах ЖРДУ. Кратко остановимся на некоторых из них.

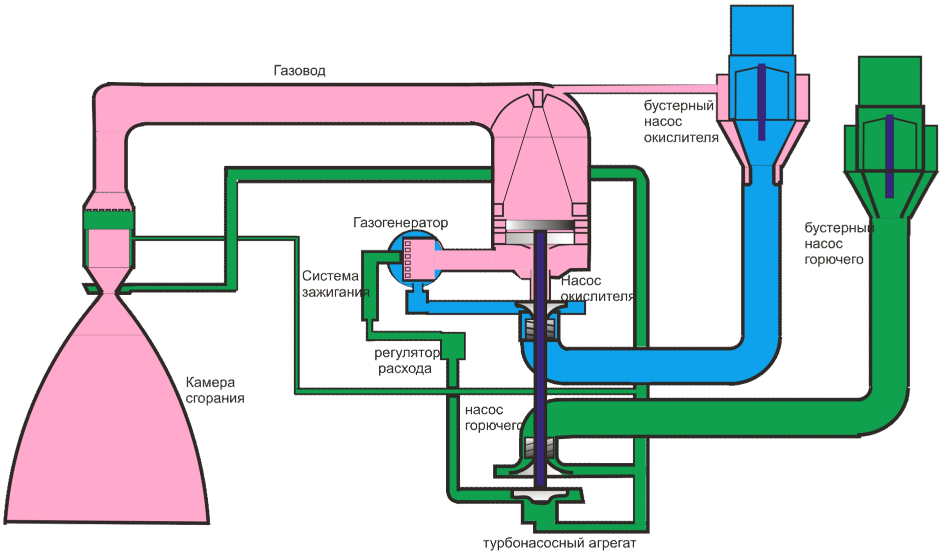

Рис. 1

Поскольку двигатели ЖРДУ I ступени рассматриваемой РН выполнены по схеме с дожиганием генераторного газа, то при математическом моделировании динамических процессов в газовых трактах двигателей важное значение имеет учет запаздываний, обусловленных неизотермичностью процессов в элементах газового тракта ЖРД (времени пребывания продуктов сгорания в газовых трактах, которое определяется кривой выгорания топлива), и запаздываний, обусловленных задержкой преобразования жидких компонентов топлива в газообразные (запаздываний газообразования). Этому вопросу посвящен ряд работ [11] – [13], в которых установлено, что определяющее влияние на частотные характеристики двигателя и переходные процессы при его запуске оказывают времена пребывания газа в газогенераторе $\tau_{П}^{ГГ}$ и газоводе $\tau_{П}^{ГВ}$, а также запаздывание газообразования в газогенераторе $\tau_{З}^{ГГ}$. Влияние запаздываний при описании низкочастотной динамики камеры сгорания – как времени пребывания $\tau_{П}^{К}$, так и запаздывания газообразования $\tau_{З}^{К}$ – незначительно и может не учитываться. В этих работах предложены также схемы приближенной замены уравнения звена запаздывания $y(t) = x(t-\tau)$ обыкновенными дифференциальными уравнениями. Эти схемы построены на основе аппроксимации передаточной функции звена запаздывания $W_e(p\tau) = \exp(-p\tau)$ дробно-рациональными функциями от $p\tau$ (здесь p – комплексная переменная преобразования Лапласа при нулевых начальных условиях; τ – время запаздывания). Показано, что для малых значений τ (таких, так $\tau_{З}^{ГГ}$) в качестве аппроксимирующей дробно-рациональной функции может быть использован дробный ряд Тейлора 1-го порядка $T_{0,1}(p\tau) = 1/(1+p\tau) \approx W_e(p\tau)$, что соответствует замене звена запаздывания апериодическим звеном. Для аппроксимации передаточных функций звеньев запаздывания в уравнениях динамики газогенератора и газовода (с запаздываниями $\tau_{П}^{ГГ}$ и $\tau_{П}^{ГВ}$) рекомендованы две дробно-рациональные функции: функция $R_{n(T02)}(p\tau) = [T_{0,2}(p\tau/2)]^2 = 1/(1+p\tau/2+0{,}125p^2\tau^2)^2 \approx W_e(p\tau)$, которая получается при замене звена запаздывания цепочкой из двух колебательных звеньев с вдвое меньшими запаздываниями [12], и функция $W_e(p^2) \approx P_{1,2}(p^2) = \left(1 - p^2/3\right)/(1 + 2p^2/3 + p^{2\,2\,2}/6)$, построенная с использованием метода Паде [13]. Аппроксимация функциями $R_{n(T02)}(p^2)$ и $P_{1,2}(p^2)$ позволяет получить приемлемые результаты расчетов запуска ЖРД для значений $\mu^2 \leq 3$ (где μ – угловая частота колебаний).

В двигателях рассматриваемой ЖРДУ осуществляется сброс газообразного кислорода после турбины БНО в поток жидкого кислорода на входе в основной насос окислителя. Наличие конденсируемого газообразного кислорода на входе в насос несет потенциальную опасность возникновения неустойчивости рабочего процесса – как за счет возможного нарушения стабильности конденсации газообразного кислорода на переходных процессах, так и в связи с возможным появлением кавитационных автоколебаний в гидравлической системе, состоящей из короткого трубопровода и основного насоса окислителя. При математическом моделировании запуска ЖРДУ I ступени рассматриваемой РН для учета вдува газообразного кислорода в поток жидкого кислорода были использованы обобщенные результаты экспериментальных исследований процесса конденсации перегретого пара кислорода в потоке жидкого кислорода [14].

Математическое моделирование динамических процессов в регуляторе расхода горючего при запуске рассматриваемых двигателей позволяет определить устойчивость работы регулятора расхода в составе двигателя, а также проанализировать процесс поступления пускового и основного горючего в газогенератор с целью оптимизации циклограммы запуска ЖРД. Используемая математическая модель регулятора расхода горючего разработана в работе [15]. В ней учитывается трение в золотнике и податливость жидкости в регуляторе расхода.

При исследовании динамики ЖРД, особенно при запуске, первостепенное значение имеет учет кавитационных явлений в насосах ЖРД [1, 8, 11, 13]. Кавитационные каверны во входной части шнекового преднасоса, несмотря на их сравнительно небольшой объем, приводят к качественному изменению динамических характеристик двигателя, снижению собственных частот колебаний в питающих гидравлических магистралях, оказывают существенное влияние на устойчивость рабочего процесса в ЖРДУ. При глубоких и продолжительных провалах входного давления, зачастую реализующихся при запуске ЖРД, может наступить кавитационный срыв, который выражается в затяжном падении напора насоса из-за кавитации в насосе, что может привести к цепочке быстро протекающих негативных динамических процессов (отрицательный баланс мощностей на валу турбонасосного агрегата, снижение частоты вращения вала и дальнейшее падение напора насоса) и завершиться нештатной или аварийной ситуацией.

Наиболее полной и завершенной математической моделью кавитационных колебаний в гидравлической системе со шнекоцентробежными насосами ЖРД является гидродинамическая модель [8], разработанная в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ). Экспериментально-расчетная гидродинамическая модель кавитационных колебаний [16], обобщающая результаты большого количества экспериментальных исследований

18 шнекоцентробежных насосов ЖРД в режиме кавитационных автоколебаний и адаптированная для широкого диапазона входных давлений [17] (от давлений срыва насоса до давлений, соответствующих началу возникновения кавитационных каверн), включает уравнение динамики кавитационных каверн, разрешенное относительно давления на входе в насос, и уравнение для определения давления на выходе из насоса:

$$\left(1+\alpha_p\right)\frac{dp_1}{dt}=\frac{G_1-G_2}{C_K}+R_{K1}\frac{dG_1}{dt}+R_{K2}\frac{dG_2}{dt}, \tag{1}$$

$$p_2=p_1+p_H\cdot\tilde{p}_H\left(\tilde{V}_K\right)-J_H\frac{dG_2}{dt}, \tag{2}$$

где p_1, G_1 – давление и расход на входе в насос; t – время; p_2, G_2 – давление и расход жидкости на выходе из насоса; p_H, $\tilde{p}_H\left(\tilde{V}_K\right)$ – напор и кавитационная функция насоса; $\tilde{V}_K = V_K / V_{Ш\,СР}$ – относительный объем кавитиционных каверн; $V_{Ш\,СР}$ – объем проточной части шнека, где расположены каверны перед кавитационным срывом: $V_{Ш\,СР} \approx 2{,}3\cdot s\cdot(D_H^2-d_{BT}^2)/4$ [8]; D_H – наружный диаметр шнека; d_{BT} – диаметр втулки шнека; s – шаг винтовой линии шнека; J_H – коэффициент инерционного сопротивления жидкости в проточной части насоса; $\alpha_p=\frac{\partial\left(B_1T_K\right)}{\partial p_1}\left(G_1-G_2\right)$; $C_K=-\frac{\gamma}{B_1}$ – податливость каверн; R_{K1}, R_{K2} – коэффициенты, имеющие размерность кавитационного сопротивления B_2: $R_{K1}=B_2-\frac{B_1\cdot T_K}{\gamma}+\frac{\partial p_{CP}}{\partial G_1}-\frac{\partial\left(B_1T_K\right)}{\partial G_1}\left(G_1-G_2\right)$, $R_{K2}=\frac{B_1\cdot T_K}{\gamma}$; $B_2\left(p_1, G_1\right)=\frac{\partial p_1}{\partial G_1}$; B_1, T_K – упругость и постоянная времени кавитационных каверн; γ – удельный вес жидкости; p_{CP} – давление срыва насоса.

Система питания окислителем ЖРДУ I ступени рассматриваемой РН включает протяженные разветвленные трубопроводы. Для математического моделирования низкочастотной динамики таких систем питания может быть рекомендован методический подход [18], который предусматривает последовательное решение следующих задач: построение линейной математической модели динамики гидравлического тракта, рассматриваемого как система с распределенными параметрами, и определение ее частотных характеристик; приближенную замену этой системы системой с сосредоточенными параметрами, построенной из конечных гидродинамических элементов, которая осуществляется на основе согласования частотных характеристик этих двух систем; построение нелинейной математической модели низкочастотной динамики гидравлического тракта, которая используется при расчете запуска и останова ЖРДУ.

На рис. 2 представлены комплексные коэффициенты усиления питающего трубопровода окислителя на участке от бака окислителя до входа в БНО (а – модуль, б – аргумент), полученные при моделировании трубопровода как системы с распределенными параметрами (кривые 1 и 2) и как системы с сосредоточенными параметрами (кривая 3), рассчитанные без учета кавитации в насосах (кривая 1) и с ее учетом (кривые 2 и 3).

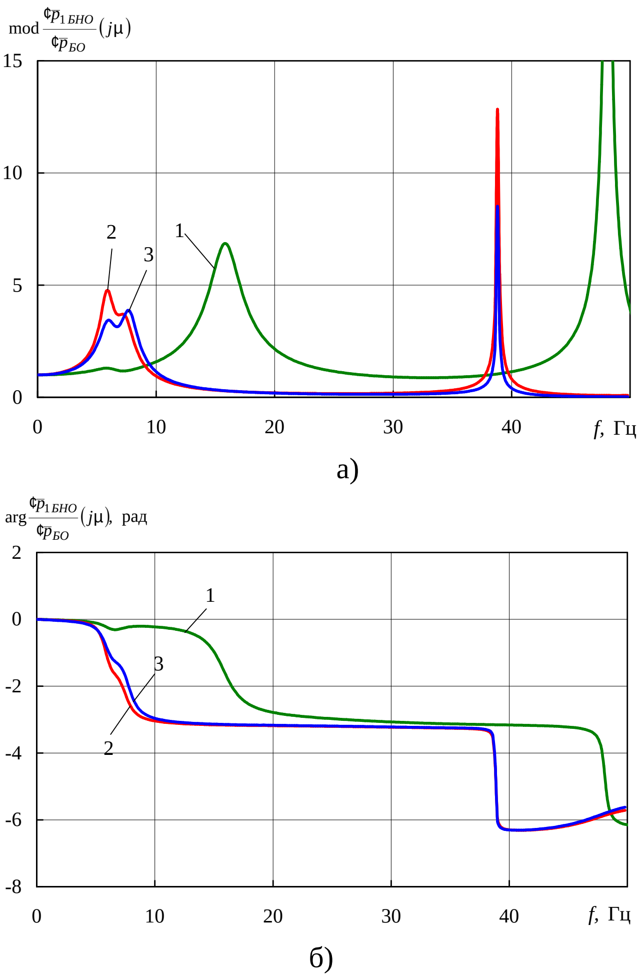

Рис. 2

Из анализа кривых на рис. 2 следует, что учет кавитации в насосах окислителя приводит к существенному снижению собственных частот колебаний жидкого топлива в системе питания двигательной установки окислителем: для I-го тона колебаний – с 16,0 Гц до 6,0 Гц, а для II-го – с 48,0 Гц до 38,8 Гц. Из рисунка также видно, что коэффициенты усиления трубопровода как системы с распределенными и системы с сосредоточенными параметрами (кривые 2 и 3) удовлетворительно согласуются в частотном диапазоне до 50 Гц.

3 Математическое моделирование неодновременного вступления в работу ЖРД. При математическом моделирования запуска многодвигательной ЖРДУ I ступени рассматриваемой РН, включающей четыре одинаковых ЖРД, учитывалась возможность неодновременного включения и выхода на режим каждого из четырех двигателей. Неодновременность вступления в работу двигателей при моделировании запуска двигательной установки реализовывалась за счет смещения подачи команд циклограммы запуска второго, третьего и четвертого двигателей относительно первого. Смещение подачи команд относится ко всем без исключения командам и имеет определенную величину (постоянную для текущего расчетного варианта запуска), которая для второго, третьего и четвертого двигателей, в общем случае, может быть различной.

Очевидно, что наихудшие варианты переходных процессов могут реализоваться как при максимальных или минимальных смещениях подачи команд, так и при их промежуточных величинах. Поэтому при формировании наборов смещений подачи команд для всех ЖРД полагалось, что значения смещений равномерно распределены между максимальным и минимальным (в данном случае под минимальным подразумевается нулевое смещение).

В таблице 1 представлена последовательность точек, равномерно распределенных в единичном четырехмерном кубе в евклидовом четырехмерном пространстве: x_1, x_2, x_3, x_4, $0 \le x_i \le 1$, $i = 1,...,4$. Эта последовательность получена в соответствии с [19] и позволяет при наименьшем количестве реализаций равномерно охватить смещения времени подачи команд второго, третьего и четвертого двигателей относительно первого. Количество реализаций в работе [19] рекомендуется выбирать кратным 2^n (где n =1, 2, 3…). Каждая строка таблицы $[x_1, x_2, x_3, x_4]$ задает одну реализацию смещений момента вступления в работу всех четырех двигателей ЖРДУ.

Таблица 1

№	x_1	x_2	x_3	x_4
1	0,500	0,500	0,500	0,500
2	0,250	0,750	0,250	0,750
3	0,750	0,250	0,750	0,250
4	0,125	0,625	0,875	0,875
5	0,625	0,125	0,375	0,375
6	0,375	0,375	0,625	0,125
7	0,875	0,875	0,125	0,625
8	0,063	0,938	0,688	0,313
9	0,563	0,438	0,188	0,813
10	0,313	0,188	0,938	0,563
11	0,813	0,688	0,438	0,063
12	0,188	0,313	0,313	0,688
13	0,688	0,813	0,813	0,188
14	0,438	0,563	0,063	0,438
15	0,938	0,063	0,563	0,938
16	0,031	0,531	0,406	0,219
17	0,531	0,031	0,906	0,719
18	0,281	0,281	0,156	0,969
19	0,781	0,781	0,656	0,469
20	0,156	0,156	0,531	0,844

Непосредственное использование данных таблицы 1 для расчетов запуска ЖРДУ вызывает определенные затруднения. Они связаны с тем, что в таблице представлены отклонения рассматриваемых параметров x_1, x_2, x_3, x_4 от средних значений в меньшую и большую сторону, а начало запуска привязано к моменту времени $t = 0$ с, и смещение в меньшую сторону не допускается. В связи с этим в рассмотрение было введено относительное время смещения. Для каждого i-го двигателя (i =1,…,4) относительное время смещения момента его вступления в работу $\Delta\bar{t}_i$ определялось как смещение момента его запуска x_i относительно момента запуска первого двигателя x_1:

$$\Delta\bar{t}_i = x_i - \min(x_1, x_2, x_3, x_4) \ .$$

На основе данных таблицы 1 получена равномерно распределенная последовательность значений относительного времени смещения момента запусков второго $\Delta\bar{t}_2$, третьего $\Delta\bar{t}_3$ и четвертого $\Delta\bar{t}_4$ двигателей (для двигателя, вступившего в работу первым, относительное смещение равно нулю). Полученные данные приведены в таблице 2. В этой таблице данные упорядочены таким образом, что порядковый номер двигателя соответствует очередности вступления его в работу. Повторяющиеся строки опущены.

Таблица 2

№	$\Delta\bar{t}_2$	$\Delta\bar{t}_3$	$\Delta\bar{t}_4$
1	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,500	0,500
3	0,500	0,750	0,750
4	0,250	0,250	0,500
5	0,250	0,625	0,875
6	0,250	0,375	0,625
7	0,125	0,375	0,750
8	0,375	0,625	0,750
9	0,125	0,125	0,500
10	0,500	0,625	0,625
11	0,375	0,375	0,500
12	0,500	0,875	0,875
13	0,188	0,375	0,500
14	0,500	0,688	0,875
15	0,125	0,125	0,813
16	0,188	0,312	0,312
17	0,000	0,375	0,688
18	0,313	0,625	0,625
19	0,313	0,313	0,688
20	0,125	0,313	0,625

На основании данных, приведенных в таблице 2, определялось абсолютное время смещения момента запуска каждого двигателя. Как известно, под относительными временами смещения запусков двигателей $\Delta\bar{t}_2$, $\Delta\bar{t}_3$ и $\Delta\bar{t}_4$ понимается отношение времен смещения запусков двигателей Δt_2, Δt_3 и Δt_4 к разбросу Δt_0 времени выхода двигателя на режим, обусловленному внутренними факторами (отклонениями параметров турбин и насосов, гидравлических сопротивлений трактов камеры сгорания и газогенератора и т. д.): $\Delta\bar{t}_2 = \Delta t_2 / \Delta t_0$, $\Delta\bar{t}_3 = \Delta t_3 / \Delta t_0$, $\Delta\bar{t}_4 = \Delta t_4 / \Delta t_0$.

При выполнении данных расчетов полагалось, что Δt_0 =0,1 с. Тогда абсолютное время смещения запуска каждого двигателя определялось соотношениями $\Delta t_i = \Delta\bar{t}_i \, \Delta t_0 = 0{,}1\Delta\bar{t}_i$ ($i = 2; 3; 4$).

4 Результаты математического моделирования запуска ЖРДУ I ступени РН. На основе математической модели низкочастотной динамики ЖРДУ была разработана математическая модель запуска ЖРДУ I ступени РН и проведены расчеты запуска ЖРДУ при различных условиях. Результаты, полученные в настоящей работе, как и результаты предыдущих исследований [20, 9, 13], показали существенное влияние запаздываний в газовых трактах (газогенераторе и газоводе) и особенно кавитационных явлений в насосах на переходные процессы при запуске двигательной установки. Основные результаты исследований по влиянию неодновременного вступления в работу двигателей представлены ниже.

На рис. 3 и 4 помещены типичные для вариантов смещения запусков из таблицы 2 зависимости расхода окислителя в общем магистральном трубопроводе G_{U1O} и давления в коллекторе окислителя p_{U1O} от времени при запуске ЖРДУ (кривые 1, 2, 3 соответствуют вариантам смещения запусков 1, 3 и 7 из таблицы 2).

Анализ этих и других, не представленных здесь результатов, показал, что забросы и провалы G_{U1O} и p_{U1O} при неодновременном вступлении в работу двигателей незначительно превышают забросы и провалы при одновременном запуске двигателей (вариант 1 из таблицы 2).

Качественно другая картина наблюдается для расхода $G_{1БНО}$ и давления

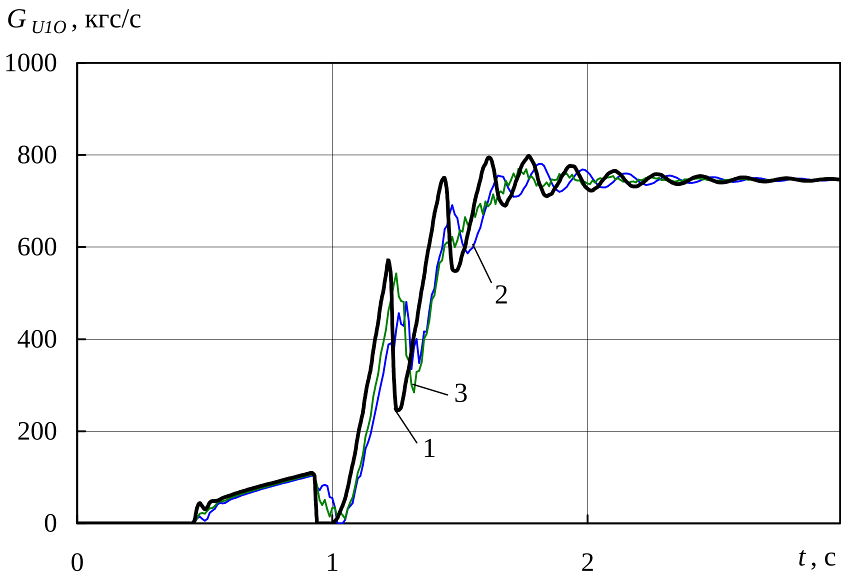

Рис. 3

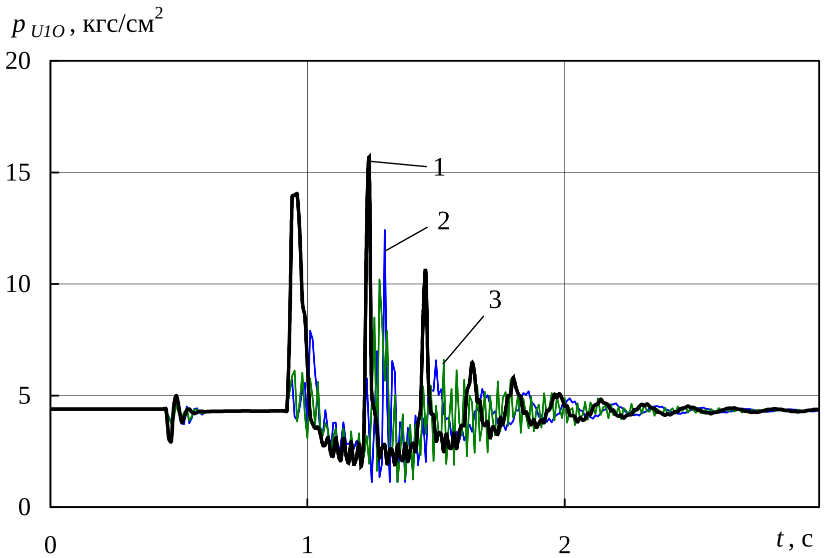

Рис. 4

$p_{1БНО}$ на входе в БНО. На рис. 5 и 6 представлены кривые переходных процессов по параметрам $G_{1БНО}$ и $p_{1БНО}$, рассчитанные при одновременном запуске четырех двигателей (кривые 0) и для варианта 7 смещения времени запуска двигателей (кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют номерам двигателей). Из рисунков видно, что сначала у третьего двигателя (при $t = 1{,}28$ с), а затем у четвертого (при $t = 1{,}30$ с) расход $G_{1БНО}$ падает почти до нуля, тогда как при одновременном запуске двигателей значения $G_{1БНО}$ не опускаются ниже отметки 62 кгс/с ($t = 1{,}26$ с). При этом у четвертого двигателя глубокий и затяжной провал расхода $G_{1БНО}$ сопровождается глубоким и затяжным провалом давления на входе в БНО $p_{1БНО}$ (в интервале времени от 1,34 с до 1,48 с). При таких условиях в указанном временном интервале возможен кавитационный срыв насоса – пусть даже одного, но он может повлечь за собой аварийную ситуацию при запуске всей двигательной установки.

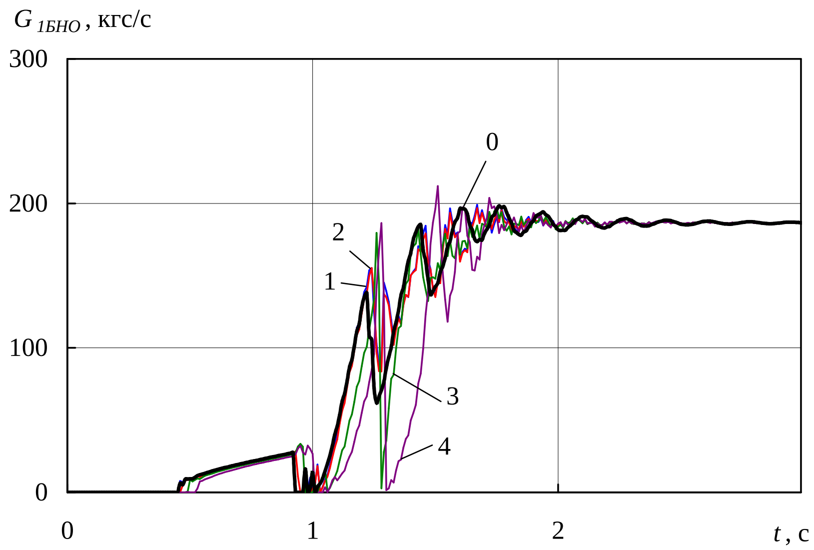

Рис. 5

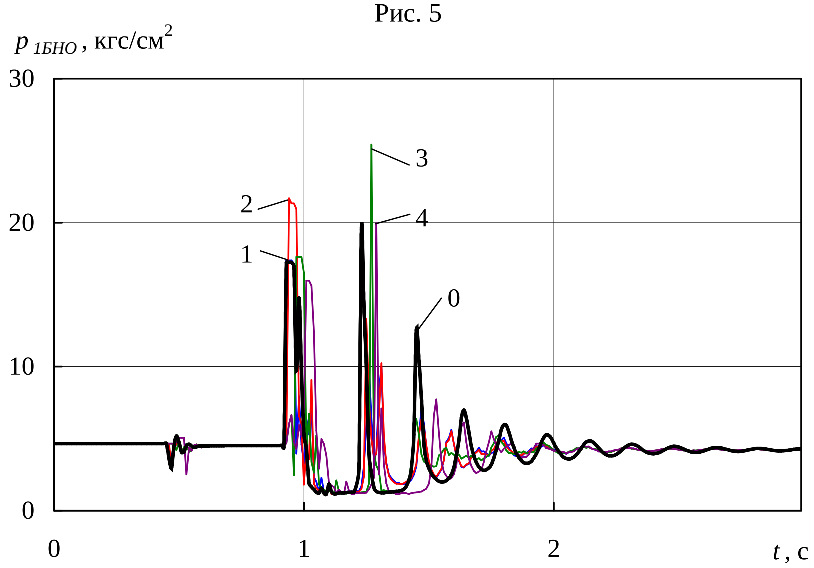

Рис. 6

Следует также отметить, что забросы давления $p_{1БНО}$ при неодновременном запуске двигателей могут значительно превышать забросы при одновременном запуске (см. кривые 2 и 3 на рис. 6).

Отличия в изменении расходов окислителя в магистральном трубопроводе G_{U1O} и на входе в БНО $G_{1БНО}$ по времени при одновременном и разновременном запуске двигателя – например, в случае реализации смещений времен запуска двигателей по варианту 7 – объясняются взаимным подавлением возмущений от двигателей в коллекторе, перераспределением расходов между трубопроводами питания от коллектора до входа в БНО.

В общем случае, возмущения в системе питания окислителем (обусловленные сначала открытием клапанов окислителя, затем воспламенением компонентов топлива в газогенераторе и последующим ростом давления в газогенераторе) либо перераспределяются между трубопроводами от коллектора до входа в двигатели, либо распространяются вверх по течению. Реализация того или иного варианта зависит от динамических характеристик системы питания, величины возмущения и разности фаз между возмущениями, действующими на различных ветках системы питания. Рассматриваемая система питания окислителем характеризуется парциальными частотами колебаний, величиной податливости в коллекторе, протяженностью трубопроводов от коллектора до входа в БНО, граничными условиями на выходе из трубопроводов (податливость кавитационных каверн на входе в БНО и основного насоса). Сложные сочетания множества всех этих факторов привели к таким реализациям переходных процессов, которые приведены на рис. 3 – 6.

На рис. 7 представлены переходные процессы давления в камере сгорания p_K при смещении времен запуска двигателей по варианту 7 (нумерация кривых соответствует нумерации на рис. 5 и 6). Из этого рисунка, а также из рис. 5 и 6, видно, что большие забросы и провалы значений параметров на входе в двигатели существенно уменьшаются в камерах сгорания двигателей, возмущения при вступлении в работу двигателей, случайным образом разнесенные по времени, значительно нивелируются. Кроме значений давления в камерах сгорания p_K, значительно нивелируются возмущения других параметров двигателей: давлений на выходе из насосов окислителя и горючего,

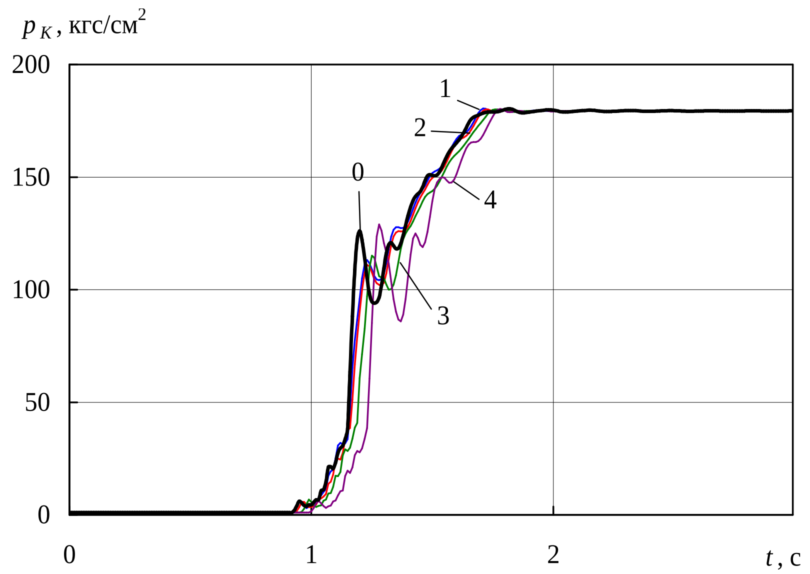

Рис. 7

давлений в газогенераторах, частот вращения валов основных турбонасосных агрегатов и т. д.

Из представленных выше результатов математического моделирования запуска двигательной установки следует, что неодновременное вступление в работу двигателей, входящих в состав рассматриваемой многодвигательной ЖРДУ, не приводит к нарушению ее работоспособности ЖРДУ при запуске.

Результаты моделирования также показывают, что разброс значений времени, при котором двигатели набирают 90 % номинального давления в камерах сгорания p_K или номинальной тяги двигателей, обусловленный неодновременным вступлением в работу двигателей, близок к заданному разбросу времени выхода двигателя на режим за счет внутренних факторов Δt_0.

Выводы. Разработана математическая модель запуска многодвигательной маршевой ЖРДУ, включающей четыре одинаковых ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа, питание которых по линии окислителя осуществляется через общий магистральный трубопровод с разветвлениями на двигатели.

Особенностью разработанной модели является учет разновременности вступления в работу двигателей при запуске ЖРДУ. Неодновременность вступления в работу двигателей при запуске моделировалась путем варьирования величины смещений подачи команд в циклограмме запуска второго, третьего и четвертого двигателей относительно первого, при этом полагалось, что величины смещений равномерно распределены между максимальным и минимальным (нулевым) смещением.

На основе разработанной математической модели проведены расчеты запуска маршевой ЖРДУ I ступени РН. Показано, что забросы и провалы значений расхода окислителя в общем магистральном трубопроводе и давления в коллекторе окислителя при неодновременном вступлении в работу двигателей незначительно превышают их забросы и провалы при одновременном запуске двигателей.

Качественно иная картина имеет место для расхода и давления окислителя на входе в бустерный насос окислителя. При одновременном запуске двигателей минимальное значение расхода окислителя на входе в бустерные насосы достигает 62 кгс/с, тогда как при их неодновременном запуске у одного или нескольких двигателей могут возникать глубокие затяжные провалы расхода на входе в бустерный насос почти до нуля, причем они сопровождаются глубокими затяжными провалами давления на входе в бустерный насос. Такие явления могут привести к кавитационному срыву бустерного насоса и, как следствие – к аварийной ситуации при запуске двигательной установки.

Существенные различия между зависимостями расхода окислителя на входе в бустерный насос от времени, полученными при реализации варианта одновременного и, соответственно, неодновременного запуска всех двигателей ЖРДУ, объясняются взаимным подавлением возмущений от двигателей в коллекторе, перераспределением расходов между трубопроводами питания от коллектора до входа в БНО.

Результаты математического моделирования запуска рассматриваемой многодвигательной ЖРДУ показали, что неодновременное вступление в работу ЖРД оказывает существенное влияние на переходные процессы в ЖРДУ, заметно ухудшая их качество. Результаты, полученные при исследовании динамических процессов в одной рассмотренной ЖРДУ, носят частный характер. Однако они позволяют сделать общий вывод, что при отработке многодвигательных ЖРДУ для обеспечения надежного запуска необходимо в каждом конкретном случае учитывать возможность неодновременного вступления двигателей в работу при запуске и исследовать влияние этого фактора на характеристики переходных процессов.

Полученные результаты могут быть использованы при математическом моделировании запуска маршевой ЖРДУ ракеты-носителя пакетной схемы или ЖРДУ, включающей несколько ЖРД.

1. *Шевяков А. А., Калнин В. М., Науменкова М. В., Дятлов В. Г.* Теория автоматического управления ракетными двигателями. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.
2. *Беляев Е. Н., Черваков В. В.* Математическое моделирование ЖРД. М.: МАИ-ПРИНТ, 2009. 280 с.
3. *Liu Wei, Chen Liping, Xie Gang, Ding Ji, Zhang Haiming, Yang Hao* Modeling and Simulation of Liquid Propellant Rocket Engine Transient Performance Using Modelica. Proc. of the 11th Int. Modelica Conf., 2015, Sept. 21–23, Versailles. France. P. 485–490. URL: www.ep.liu.se/ecp/118/052/ecp15118485.pdf от 13.07.2017
4. *Di Matteo, Fr., De Rosa, M., Onofri, M.* Start-Up Transient Simulation of a Liquid Rocket Engine. AIAA 2011-6032 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (31 July – 03 August 2011), San Diego, California. 15 p. URL: www.enu.kz/repository/2011/AIAA-2011-6032.pdf. https://doi.org/10.2514/6.2011-6032
5. *Белов Г. В.* Моделирование равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем. Математическое моделирование. 2005. Т. 17, № 2. С. 81–91.
6. *Лебединский Е. В., Зайцев Б. В., Соболев А. А.* Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода для ЖРД. Сайт ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». 2011. С. 10.
7. *Лебединский Е. В., Калмыков Г. П., Мосолов С. В.* и др.; под ред. *Коротеева А. С.* Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование. М.: Машиностроение. 2008. 512 с.
8. *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С.* Кавитационные колебания и динамика гидросистем. М.: Машиностроение. 1977. 352 с.
9. *Пилипенко О. В., Прокопчук А. А., Долгополов С. И., Писаренко В. Ю., Коваленко В. Н., Николаев А. Д., Хоряк Н. В.* Особенности математического моделирования низкочастотной динамики маршевого ЖРД с дожиганием генераторного газа при запуске. Космічна наука і технологія. 2017. Т. 23, № 5. С. 3–12. https://doi.org/10.15407/knit2017.05.003
10. Дегтярев *А. В.* Ракетная техника. Проблемы и перспективы. Днепропетровск.: АРТ-ПРЕСС. 2014. 420 с.
11. *Пилипенко О. В., Прокопчук А. А., Долгополов С. И., Хоряк Н. В., Николаев А. Д., Писаренко В. Ю., Коваленко В. Н.* Математическое моделирование и анализ устойчивости низкочастотных процессов в маршевом ЖРД с дожиганием генераторного газа. Вестник двигателестроения. 2017. № 2. С. 34–42.
12. *Хоряк Н. В., Долгополов С. И.* Особенности математического моделирования динамики газовых трактов в задаче об устойчивости низкочастотных процессов в жидкостных ракетных двигателях. Техническая механика. 2017. № 3. С. 30–44. https://doi.org/10.15407/itm2017.03.030
13. *Пилипенко О. В., Хоряк Н. В., Долгополов С И., Николаев А. Д.* Математическое моделирование динамических процессов в гидравлических и газовых трактах при запуске ЖРД с дожиганием генераторного газа. Техническая механика. 2019. № 4. С. 5–20. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.005
14. *Пилипенко В. В., Дорош Н. Л., Манько И К.* Экспериментальные исследования конденсации пара при вдуве струи газообразного кислорода в поток жидкого кислорода. Техническая механика. 1993. Вып. 2. С. 77–80.
15. *Долгополов С. И., Николаев А. Д.* Математическое моделирование низкочастотной динамики регулятора расхода жидкости при различных амплитудах гармонического возмущения. Техническая механика. 2017. № 1. С. 15–25.
16. *Пилипенко В. В., Долгополов С. И.* Экспериментально-расчетное определение коэффициентов уравнения динамики кавитационных каверн в шнекоцентробежных насосах различных типоразмеров. Техническая механика. 1998. № 8. С. 50–56.
17. *Долгополов С. И.* Адаптация гидродинамической модели кавитационных колебаний для моделирования динамических процессов в насосных системах при больших числах кавитации. Техническая механика. 2017. № 2. С. 12–19. https://doi.org/10.15407/itm2017.02.012
18. *Долгополов С. И., Заволока А. Н., Николаев А. Д., Свириденко Н. Ф., Смоленский Д, Э.* Определение параметров гидродинамических процессов в системе питания космической ступени при остановах и запусках маршевого двигателя. Техническая механика. 2015. № 2. С. 23–36.
19. *Соболь И. М., Статников И. М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука. 1981. 110 с.
20. *Пилипенко В. В., Долгополов С. И.* Математическое моделирование запуска жидкостного ракетного двигателя РД–8 с учетом кавитации в насосах. Техническая механика. 2003. № 2. С. 18–24.

Получено 10.02.2020,
в окончательном варианте 25.02.2020