

# РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ НАПОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Д. А. Савчин, В. П. Назаров

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева  
Россия, 660037, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31

Статья посвящена моделированию процесса снятия напорной характеристики насосов жидкостных ракетных двигателей для определения перспективы внедрения автоматизированных гидравлических испытаний в производство жидкостных ракетных двигателей с целью повышения их надежности и снижения трудоемкости изготовления. В рамках работы создана симуляция процесса определения напорной характеристики в автоматизированном и неавтоматизированном вариантах. Полученные данные показывают значительное снижение погрешности результатов испытаний при автоматизации процесса при одновременном снижении трудоемкости.

**Ключевые слова:** автоматизация, гидродинамические испытания, насосы ЖРД, напорная характеристика, пьезорезистивный датчик давления, математическая модель.

## Введение

Одним из основных показателей эксплуатационной надежности жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) является обеспечение точности и достоверности результатов испытаний, которые проводятся в процессе производства узлов и агрегатов двигателя [1]. Согласно источнику [2] надежность жидкостного ракетного двигателя — это свойство ЖРД сохранять работоспособное состояние при установленных условиях эксплуатации.

Сохранение работоспособного состояния означает, прежде всего, способность двигателя создавать тягу установленного значения при выполнении требований по обеспечению заданного удельного импульса.

Тяга ракетного двигателя на расчетном режиме определяется по формуле (1) [3]:

$$P = \dot{m}\omega, \quad (1)$$

где  $\dot{m}$  — массовый расход компонентов топлива, кг/с;  $\omega$  — скорость истечения потока газов, м/с.

Значение суммарного массового расхода компонентов зависит от массовых расходов компонентов, проходящих через насосы окислителя и горючего. Скорость истечения газа прямо пропорциональна давлению в камере сгорания ЖРД, которое зависит от напора, создаваемого насосами согласно зависимости (2):

$$H = \frac{P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}}{\rho}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{вых}}$  — давление на выходе из насоса, Па;  $P_{\text{вх}}$  — давление на входе в насос, Па;  $\rho$  — плотность компонента, кг/м<sup>3</sup>.

Способность насосов обеспечить требуемое значение напора при изменяющемся значении расхода является одним из самых важных показателей работы системы подачи ЖРД ввиду того, что изменением расхода происходит регулирование тяги,

а значит, для обеспечения работоспособности двигателя требуется стабильная работа насосов в широком диапазоне расходов.

Зависимость, отражающая вышеупомянутую способность, является напорной характеристикой. Для определения данной характеристики насосы ЖРД проходят гидродинамические испытания (ГДИ).

В настоящее время существующие методики определения вышеуказанных параметров обладают значительными погрешностями и являются трудоемкими, так как регистрация параметров испытаний полностью зависит от квалификации оператора, что в совокупности делает процесс гидравлических испытаний неэффективным с точки зрения получаемых результатов относительно затрачиваемых ресурсов.

## Постановка задачи

Во введении были определены следующие основные недостатки существующей методики: недостаточная точность определения основных параметров и значительная трудоемкость самого процесса.

Одним из способов совершенствования методики проведения ГДИ насосов ЖРД в частности и испытаний ЖРД в целом является автоматизация процесса проведения испытаний. В работе [4] описана автоматизация стенда огневых испытаний ЖРД и сделан вывод о превосходстве такой системы над существующими в части надежности работы, удобства получения, обработки, передачи и хранения информации, удобства работы оператора.

Для подтверждения эффективности и дальнейшего совершенствования методики автоматизации ГДИ центробежных насосов ЖРД необходимо создать математическую модель испытаний, отражающую свойства средств измерений, насосов, а также их взаимодействие в заданных условиях.

В рамках настоящего исследования необходимо выполнить моделирование напорных испытаний. Для этого в исследовании требуется представить

модели датчиков давлений, стрелочных измерительных приборов, управляющих устройств, средств обработки и представления информации. Также модель процесса испытаний должна соответствовать требованиям, предъявляемым к ГДИ в соответствующей отраслевой нормативной документации.

### Теория

Согласно источнику [5], напор насоса — это приращение механической энергии жидкости, прошедшей через насос.

Полученная жидкостью энергия требуется для преодоления различных гидравлических сопротивлений (клапаны, дроссели, шероховатость трубопроводов и т.д.) с тем, чтобы давление компонентов в камере сгорания двигателя было равно заданному значению.

При производстве турбонасосных агрегатов каждый насос проходит гидравлические испытания по определению действительного значения напора.

Испытательный стенд состоит из емкости, обеспечивающей запас модельной жидкости, различной арматуры, производящей изменение параметров расхода, входного давления, гидравлического сопротивления, а также измерительных устройств и трубопроводов.

Существующая методика предполагает ручное измерение значений напора по конечному числу точек, соответствующих определенным значениям расхода. По этим точкам строится напорная характеристика насоса, отражающая его работу в условиях изменяющегося расхода.

С целью совершенствования методики определения напора насосов ЖРД была создана модель процесса испытаний, учитывающая требования, обозначенные в разделе «Постановка задачи».

Изучая опыт зарубежных ученых путем анализа научных публикаций по теме исследования, была определена общая схожесть методик испытаний центробежных насосов ЖРД, применяемых в России и за рубежом.

Так, при проектировании испытательного стенда, описанного в работе [6], был использован замкнутый контур, содержащий расходную емкость, регулятор расхода, компенсационный бак с возможностью регулирования давления, в качестве модельной жидкости использовалась вода, что в целом соответствует конструкции отечественных стендов.

Основные различия при проектировании испытательных стендов возникают при выборе измерительного оборудования. Так, данные из источников [6, 7] свидетельствуют об отсутствии в конструкции зарубежных стендов измерительных приборов, требующих для фиксирования значений измеряемых величин участия оператора.

Схожесть иностранных и российских методик определения напорных характеристик центробежных насосов проявляется в части требуемых для их построения параметров и дискретного характера изменения расхода.

Анализ зарубежных работ, содержащих моделирование испытаний, показал отсутствие сравнения автоматизированных и неавтоматизированных процессов. Кроме того, в иностранных источниках моделирование проведено в отличных от используемых в настоящей работе программных пакетах.

Ввиду отсутствия информации, характеризующей преимущество автоматизированной методики определения напорной характеристики насосов

ЖРД над неавтоматизированной и учитывая значительные первоначальные затраты на автоматизацию процесса испытаний, предполагаемые результаты данной работы позволят оценить целесообразность автоматизации процесса получения напорной характеристики насосов ЖРД.

Первоначально было выполнено моделирование измерительных устройств. Основным назначением измерительной аппаратуры в составе испытательного стенда является измерение параметров насосов, таких как давление на входе и выходе, массовый расход через насос, частота вращения ротора насоса, температура рабочей жидкости. С учетом анализа выражения (2) в данной работе было выполнено моделирование датчиков давления и манометров, как оказывающих наибольшее влияние на точность определения напорной характеристики.

Выполнение моделирования подобных систем в целом и измерительных устройств в частности возможно в различных пакетах. Так, в работе [6] численное моделирование испытательного стенда выполнено в пакете EcosimPro, однако авторы не представили детального описания моделей, входящих в состав стенда узлов.

В данной работе моделирование выполнено в пакете Simulink с использованием справочной информации из источника [7].

Учитывая требования к испытательным стендам для изделий ракетно-космической техники, изложенные в монографии [8], для автоматизированной системы ГДИ требуются датчики давления, обладающие следующими свойствами: минимальная погрешность измерений, минимальная зависимость показаний от температуры, устойчивость к механическим воздействиям, максимальное безотрадное действие, а также стабильность параметров на протяжении всего срока эксплуатации. Согласно источнику [9], наиболее подходящим типом датчиков с учетом вышеуказанных требований является пьезорезистивный. В качестве реального примера был выбран датчик давления Dmp 333 ввиду использования данного оборудования на базовом предприятии.

Моделирование датчиков давления было начато с определения передаточной функции — идеального соотношения между входным и выходным сигналом. Передаточная функция датчика «Dmp 333» с диапазоном измерений 0...6 МПа определяется формулой (3) [10]:

$$S = 4 + 2,666s. \quad (3)$$

Представленная линейная зависимость не может отражать реальную работу датчика, так как любой измерительный прибор обладает такими свойствами как нелинейность, гистерезис, повторяемость, поэтому для приближения модели к реальному объекту необходимо учитывать погрешность, которая для датчика Dmp 333 составляет  $\leq \pm 0,35$  % от диапазона измерения. В используемой модели ошибка датчика представлена как абсолютная погрешность, случайно изменяющаяся в интервале значений 0...0,35 %. Также случайным образом изменяется знак погрешности. Пример модели датчика представлен на (рис. 1).

Подобным образом осуществлено моделирование стрелочных измерительных приборов, однако в этом случае погрешность измерения состоит из погрешности манометра, определяемой исходя из класса точности прибора, а также субъективной

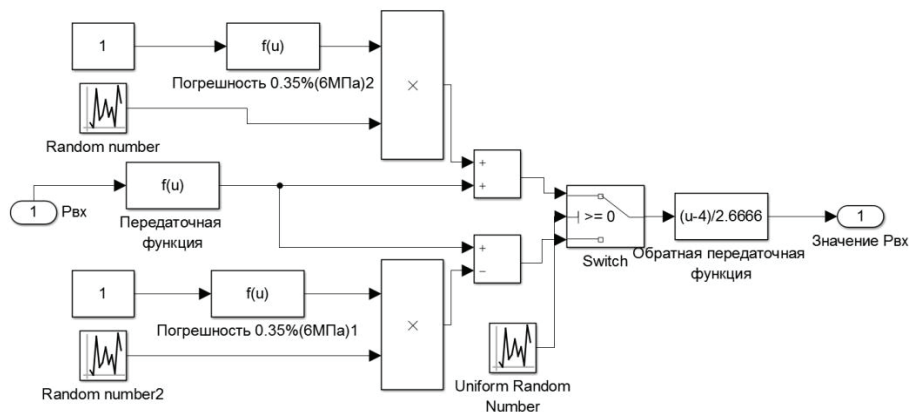


Рис. 1. Модель датчика входного давления в пакете Simulink  
 Fig. 1. Model of the input pressure sensor in the Simulink package

погрешности, характеризуемой индивидуальными особенностями оператора [11].

Кроме измерительных приборов в процессе испытаний участвуют устройства, создающие определенные условия, такие как изменяющийся расход через насос. Их моделирование сводится к нахождению дискретной или непрерывной линейной функции, удовлетворяющей требованиям по амплитуде сигнала, отражающей величину изменения расхода или давления, и интервалам времени, отражающим количество и длительность режимов на контрольных точках. Пример модели задвижки, регулирующей расход, представлен на рис. 2.

Модель насоса представлена как линейный усилительный элемент с коэффициентом усиления, равным 5.

Завершающим этапом создания модели стало моделирование работы насоса при изменяющемся расходе.

Напор центробежного насоса на расчетном режиме максимален и соответствует оптимальной скорости на выходе из колеса для соответствующего отвода ввиду минимума гидравлических потерь. При меньших значениях расхода скорость потока на выходе из колеса становится выше оптимальной:

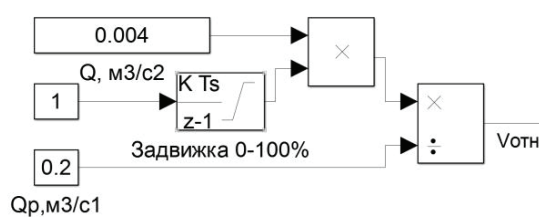


Рис. 2. Модель задвижки в пакете Simulink  
 Fig. 2. Gate valve model in the Simulink package

сечение отвода становится перерасширенным. При больших значениях расхода скорость потока на выходе из колеса становится меньше оптимальной: сечение отвода является зауженным [5].

Таким образом, напор центробежного насоса возрастает при повышении расхода от минимальных значений до расчетного и убывает при превышении этого значения, что должно отражаться видом напорной характеристики, полученной в ходе моделирования.

Изменение напора вследствие изменения расхода через насос было смоделировано, используя зависимость (4), из источника [5]:

$$\tilde{H} = \frac{H}{H_p} = \frac{k_z(1 - \tilde{V}q_p) - 0,5\zeta_k \bar{D}_1^2 K - 0,5\zeta_{омв.р} k_z^2 - (1 - \tilde{V}q_p)^2 - 0,5A k_z^2 (1 - \tilde{V})^2}{k_z(1 - q_p) - 0,5\zeta_k \bar{D}_1^2 - 0,5\zeta_{омв.р} k_z^2 - (1 - q_p)^2} \quad (4)$$

Коэффициенты  $k_z, \tilde{V}, q_p, \zeta_k, \bar{D}_1^2, K, \zeta_{омв.р}, A$  характеризуют гидравлические параметры, зависящие от конструкции подвода, отвода, диаметра центробежного колеса, расходного параметра каждого конкретного насоса и были взяты из теоретического расчета центробежного насоса окислителя для двигателя с дожиганием генераторного газа.

Общий вид блока, моделирующего зависимость напора от расхода, представлен на рис. 3.

Объединив описанные выше блоки в единую систему, была получена математическая модель, отражающая процесс напорных испытаний. На вход в насос подается давление 6 МПа, после чего происходит повышение давления до 30 МПа. Датчики давления и манометры регистрируют значения входного и выходного давлений со свойственными каждому типу измерительных устройств погрешностями, после чего происходит расчет значений напора. В блоках  $H_p$  и  $H_{p1}$ . Блок «Задвижка» отвечает за ступенчатое снижение напора, расчетное

значение которого равно 0,2 м³/с. Сигнал, отражающий изменение напора, поступает на вход в блок зависимости  $H=f(Q)$ , где происходит определение коэффициента напора, умножение которого на значения, полученные при помощи замеров, дает фактическое значение напора в зависимости от фактического расхода.

Общий вид модели испытаний представлен на рис. 4.

Взаимодействие аппаратной и программной части возможно выполнить по схеме, описанной в работе [12]. Так, согласно этому исследованию, сигналы, поступающие от датчиков, могут быть преобразованы в измерительном аналоговом модуле типа ОВЕН МВА8. Этот модуль осуществляет передачу компьютеру информации о значениях измеренных датчиками величин (интерфейс связи с компьютером RS-485). Информация о измеренных параметрах поступает в модуль сбора данных типа MCD-100, предназначенный для сбора, сбережения

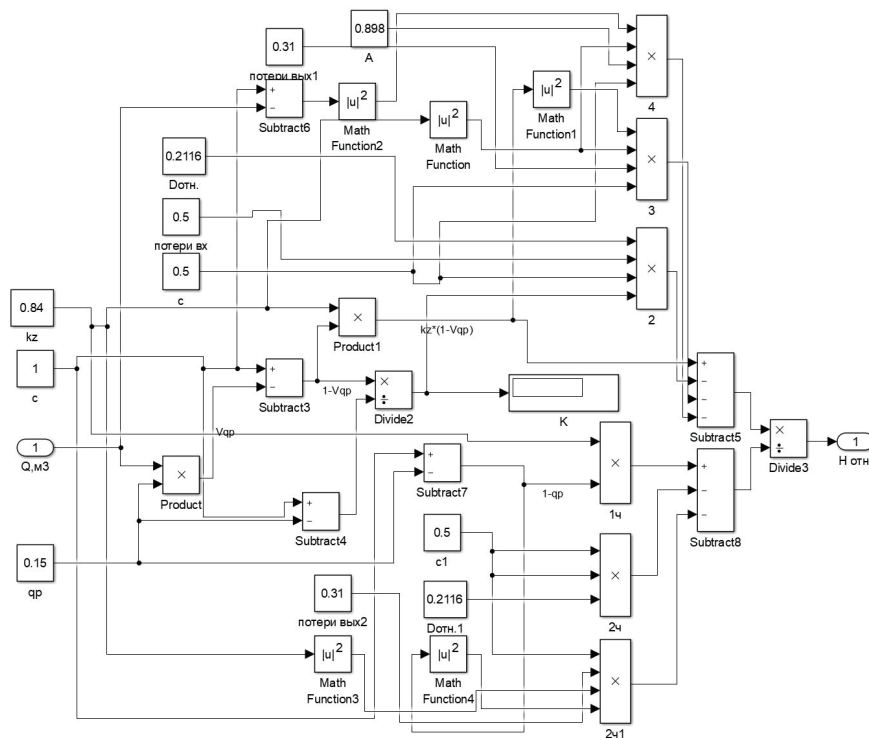


Рис. 3. Общий вид блока зависимости  $H=f(Q)$  в пакете Simulink  
 Fig. 3. General view of the block of dependence  $H=f(Q)$  in the Simulink package

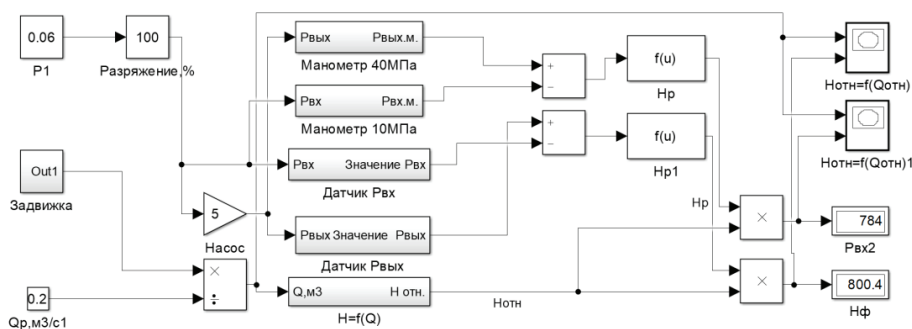


Рис. 4. Общий вид модели испытаний в пакете Simulink  
 Fig. 4. General view of the test model in the Simulink package

и передачи данных, для формирования архива полученных данных на сменной карте памяти в виде файлов, для передачи сформированного архива в ЭВМ, а также для измерения на двух входах токовых сигналов от 4 до 20 мА и пересчета значений тока в единицы физических величин. Для взаимного электрического преобразования сигналов интерфейсов RS-485 предназначен преобразователь интерфейсов типа ОВЕНАС-4, который автоматически определяет направление передачи данных и позволяет подключить к промышленной сети RS-485 персональный компьютер (ПК). Данные записываются в файл в формате \*.xls с возможностью выборки необходимых данных для построения графиков рабочих характеристик.

### Результаты экспериментов

В результате выполнения работы была получена математическая модель системы насос-испытательный стенд-система регистрации и обработки данных в автоматизированном и неавтоматизи-

рованном вариантах в пакете Simulink. На рис. 5 представлены напорные характеристики, полученные автоматизированным и неавтоматизированным способами.

Точки  $K$ ,  $K_1$  — соответствуют точкам расчетного напора. Как видно из графика, разница результатов автоматизированного и неавтоматизированного процессов испытаний в области расчетных значений расхода доходит до 100 м при  $H_{расч} = 2600$  м, что соответствует разнице в 3%. Также из графика видно значительное рассеяние значений напора для неавтоматизированного способа.

### Обсуждение результатов

Полученная в ходе исследования модель отражает ключевые особенности процесса испытаний центробежных насосов ЖРД. Модели измерительных устройств выполнены таким образом, чтобы показать влияние погрешностей, заложенных особенностями конструкций и условиями работы измерительных приборов.

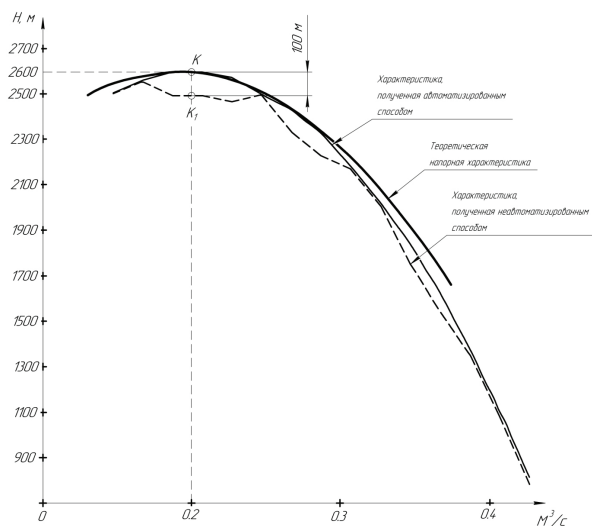


Рис. 5. Напорные характеристики  
Fig. 5. Pressure characteristics

Из анализа напорных характеристик, представленных на рис. 4, видно, что характеристика, полученная неавтоматизированным способом, имеет значительные отклонения от теоретической кривой ввиду больших по сравнению с автоматизированным способом погрешностей. Погрешность испытаний, проводимых согласно существующим методикам, достигает до 3%, что также свидетельствует о необходимости внедрения автоматизированной системы проведения испытаний.

#### Выводы и заключение

В процессе выполнения работы была создана модель автоматизированного и неавтоматизированного процесса получения напорной характеристики насосов ЖРД, включающая модели датчиков давления, манометров, модель задвижки, а также модель насоса, отражающую взаимосвязь напора и расхода. Полученные результаты показывают, что неавтоматизированный процесс определения напорной характеристики дает результаты с большой погрешностью ввиду недостаточной точности манометров, а также влияния субъективной погрешности построения и снятия показаний. Данные особенности снижают достоверность результатов испытаний и приводят к снижению надежности вследствие повышения вероятности допуска бракованных шнекоцентробежных колес в дальнейшее изготовление турбонасосных агрегатов. Кроме того, увеличение погрешности определения параметров насосов приводит к повышению вероятности ошибочного вывода в части определения годности ДСЕ, что влечет за собой дополнительные убытки для изготовителя.

#### Список источников

1. Коломенцев А. И., Краев М. В., Назаров В. П. [и др.]. Испытание и обеспечение надежности ракетных двигателей. Красноярск: СибГАУ; Москва: МАИ, 2006. 336 с.
2. ГОСТ 17655-89. Двигатели ракетные жидкостные. Термины и определения. Введ. 1991–01–01. Москва: Издательство стандартов, 1990. 59 с.
3. Алмасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей / под ред. В. П. Глушко. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1980. 533 с.
4. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного

двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3 (21). С. 18–25. DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-3.

5. Овсянников Б. В., Боровский Б. И. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1986. 374 с.

6. Pauw J., Veggi L., Wagner B. [et al.]. Design Procedure of a Turbopump Test Bench // 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC 2017). Maui, United States, 2017. hal-02419962.

7. Exponenta: MATLAB, Simulink. URL: <https://exponenta.ru/simulink> (дата обращения: 25.10.2020).

8. Галеев А. Г., Иванов В. Н., Катенин А. В. [и др.]. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов: моногр. Киров: МЦНИП, 2015. 436 с. ISBN 978-5-00090-054-3.

9. Gassmann E., Gries A. Electronic Pressure Measurement. Munich: Sudeutscher Verlag onpact GmbH, 2009. 70 p.

10. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / пер. с англ. Ю. А. Заболотной; под ред. Е. Л. Свинцова. Москва: Техносфера, 2005. 588 с. ISBN 5-94836-050-4.

11. Яременко О. В. Испытания насосов. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1976. 225 с.

12. Канюк Г. И., Мезеря А. Ю., Андреев А. В. [и др.]. Автоматизация испытаний насосов // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2016. № 1 (144). С. 28–33.

**САВЧИН Дмитрий Александрович**, аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов.

SPIN-код: 3185-4624

AuthorID (РИНЦ): 1092360

Адрес для переписки: savchin.dim@yandex.ru

**НАЗАРОВ Владимир Павлович**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов.

AuthorID (РИНЦ): 113409

Адрес для переписки: nazarov@sibsau.ru

#### Для цитирования

Савчин Д. А., Назаров В. П. Разработка и анализ модели процесса получения напорной характеристики центробежных насосов жидкостных ракетных двигателей // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 1. С. 95–100. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-95-100

Статья поступила в редакцию 09.12.2020 г.

© Д. А. Савчин, В. П. Назаров



# DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF SIMULATION OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINE PUMP HEAD CURVE OBTAINING PROCESS

D. A. Savchin, V. P. Nazarov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Russia, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy Ave., 31, 660037

The paper describes the model of the centrifugal pump head curve obtaining process which helps in consideration of the implementation of automated systems in liquid-propellant rocket engine manufacturing. The work contains the simulation of automated and non-automated head curve obtaining. The developed model shows that the automated process exceeds the non-automated analog in terms of error values and labor intensity.

**Keywords:** automatization, hydraulic test, head curve, piezo-resistive pressure sensor, mathematical model, centrifugal pump.

## References

1. Kolomentsev A. I., Krayev M. V., Nazarov V. P. [et al.]. *Ispytaniye i obespecheniye nadezhnosti raketnykh dvigateley* [Testing and ensuring the reliability of rocket engines]. Krasnoyarsk; Moscow, 2006. 336 p. (In Russ.).
2. GOST 17655-89. *Dvigateli raketnyye zhidkostnyye. Terminy i opredeleniya* [Liquid rocket engines. Terms and Definitions]. Moscow, 1990. 59 p. (In Russ.).
3. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. *Teoriya raketnykh dvigateley* [Theory of rocket engines] / Ed. V. P. Glushko. 3rd ed. Moscow, 1980. 533 p. (In Russ.).
4. Bastrygin K. I., Trofimov A. A. *Sistema izmereniya, monitoringa, kontrolya i diagnostiki parametrov raketnogo dvigatelya* [The measurement system, monitoring, control and diagnostics parameters of the rocket engine] // *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'. Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'*. 2017. No. 3 (21). P. 18–25. DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-3. (In Russ.).
5. Ovsyannikov B. V., Borovskiy B. I. *Teoriya i raschet agregatov pitaniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Theory and calculation of power units for liquid rocket engines]. 3rd ed. Moscow, 1986. 374 p. (In Russ.).
6. Pauw J., Veggi L., Wagner B. [et al.]. *Design Procedure of a Turbopump Test Bench* // 17th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC 2017). Maui, United States, 2017. hal-02419962. (In Engl.).
7. Exponenta: MATLAB, Simulink. URL: <https://exponenta.ru/simulink> (accessed: 25.10.2020). (In Engl.).
8. Galejev A. G., Ivanov V. N., Katenin A. V. [et al.]. *Metodologiya eksperimental'noy otrabotki ZhRD i DU, osnovy provedeniya ispytaniy i ustroystva ispytatel'nykh stendov* [Methodology for experimental development of liquid-propellant rocket engines and propulsion systems, the basics of testing and the arrangement of test stands]. Kirov, 2015. 436 p. ISBN 978-5-00090-054-3. (In Russ.).
9. Gassmann E., Gries A. *Electronic Pressure Measurement*. Munich: Sudddeutscher Verlag onpact GmbH, 2009. 70 p. (In Engl.).
10. Fraden J. *Sovremennyye datchiki. Spravochnik* [Modern Sensors. Handbook] / trans. from Engl. Yu. A. Zabolotnaya; Ed. E. L. Svintsov. Moscow, 2005. 588 p. ISBN 5-94836-050-4. (In Russ.).
11. Yaremenko O. V. *Ispytaniya nasosov. Spravochnoye posobiye* [Testing pumps. Handbook]. Moscow, 1976. 225 p. (In Russ.).
12. Kaniuk G. I., Mezerya A. J., Andreev A. V. [et al.]. *Avtomatizatsiya ispytaniy nasosov* [Test automation pumps] // *Energoberezheniye. Energetika. Energoaudit. Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*. 2016. No. 1 (144). P. 28–33. (In Russ.).

**SAVCHIN Dmitriy Aleksandrovich**, Graduate Student of Aircraft Engines Department.

SPIN-code: 3185-4624

AuthorID (RSCI): 1092360

Address for correspondence: [savchin.dim@yandex.ru](mailto:savchin.dim@yandex.ru)

**NAZAROV Vladimir Pavlovich**, Candidate of Technical Sciences, Head of Aircraft Engines Department.

AuthorID (RSCI): 113409

Address for correspondence: [nazarov@sibsau.ru](mailto:nazarov@sibsau.ru)

## For citations

Savchin D. A., Nazarov V. P. Development and analysis of simulation of liquid-propellant rocket engine pump head curve obtaining process // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 95–100. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-1-95-100.

Received December 9, 2020.

© D. A. Savchin, V. P. Nazarov