

## Комплекс для учебно-исследовательских автоматизированных испытаний газотурбинных двигателей

В.А. Григорьев<sup>1</sup>, П.Г. Зубков<sup>1</sup>, Д.С. Калабухов<sup>1</sup>, С.К. Бочкарёв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

Поступила в редакцию 06.09.2018

### Аннотация

Описана необходимость внедрения в образовательный и исследовательский процессы инновационных автоматизированных методов и средств испытаний авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок. Дано краткое описание экспериментальных установок учебно-исследовательского комплекса испытаний газотурбинных двигателей Самарского университета, описаны их основные особенности. Приведена структура измерительно-вычислительного комплекса стендов и особенности управления процессами подготовки, запуска и испытаниями двигателей.

**Ключевые слова:** учебно-исследовательский комплекс, испытания, газотурбинный двигатель, высотно-климатический стенд, измерительно-вычислительный комплекс.

**Key words:** educational and research complex, testing, turbine engine, high-altitude climate stand, measuring and computing complex.

### Введение

Совершенство силовых установок во многом определяет лётно-технические и экономические характеристики летательных аппаратов гражданской и военной авиации. Практика создания и эксплуатации новых авиационных двигателей показала, что улучшение технических данных серийно выпускаемых двигателей невозможно без большого числа экспериментальных исследований. При этом стоимость опытных образцов двигателей и стоимость проведения их испытаний постоянно возрастает. В связи с этим, для достижения повышенной точности и увеличения объема получаемой информации в ходе испытаний при условии уменьшения их длительности, а также для приближения испытаний к реальным условиям эксплуатации требуется внедрение современных методов и средств автоматизированных испытаний.

### Цели и задачи

Производственные помещения учебной лаборатории по испытаниям ВРД кафедры теории двигателей летательных аппаратов (ТДЛА) были введены в эксплуатацию в 1983 г. Инициаторами создания на этой базе учебно-исследовательского комплекса (УИК) испытаний газотурбинных двигателей были В.П. Лукачёв – ректор КуАИ и заведующий кафедры ТДЛА, и профессор этой кафедры В.Г. Маслов. С момента образования и до настоящего времени комплекс прошел три очереди развития и постоянно совершенствуется.

УИК используется для испытаний авиационных газотурбинных двигателей основных типов (ТРД, ТВД и ТРДД), а также энергетических установок. Для этого применяется ряд стендов, оснащенных измерительно-вычислительными комплексами (ИВК) для автоматизации процесса изме-

рений и испытаний. УИК позволяет решать следующие задачи:

- автоматизированное измерение и регистрация термогазодинамических, режимных и прочностных параметров двигателей;
- автоматизированная первичная и вторичная обработка результатов измерений;
- управление режимами работы двигателей как в ручном, так и в автоматизированном режиме по заданной программе испытаний;
- непрерывный контроль и сигнализация предаварийных и аварийных значений параметров на видеомониторах;
- обработка наиболее важной информации в темпе испытания и выдача результатов экспресс-анализа на устройства отображения информации (дисплей, печатный протокол);
- хранение необходимой информации в базе данных.

Испытания двигателей проводятся в стендовых, то есть наземных условиях. Кроме того, в состав УИК входит высотно-климатический стенд (ВКС), предназначенный для испытаний малоразмерных ГТД любых типов в условиях, соответствующих высоте полёта  $H = 0...3$  км и температуре на входе в двигатель  $T_H = 223...323$  К ( $-50...+50^\circ\text{C}$ ). Эти условия обеспечиваются с помощью специальных систем и термобарокамеры [1].

Система измерений для проведения учебных испытаний отвечает следующим требованиям:

- объем информации, получаемый при испытании, обеспечивает выполнение студентами основных элементов термогазодинамического анализа рабочего процесса;
- препарирование двигателя обеспечивает возможность визуального контроля измеряемых параметров, а также ввод в автоматизированную систему измерений;
- основные конструктивные решения препарирования двигателя соответ-

ствуют типичному препарированию ГТД;

- точность измерений удовлетворяет требованиям [2], предъявляемым к стендовым измерительным системам и средствам измерений.

### Экспериментальные установки УИК

В состав УИК входят три испытательных стенда и учебный компьютерный класс.

**1. Экспериментальная установка для испытаний малоразмерных ТРД и ТВД.** Установка размещается в испытательном боксе с габаритами 9х3х3 м (рис. 1.). Помещение бокса отгорожено от пультовой защитной перегородкой и взрывонепроницаемым окном кабины наблюдения. Воздух попадает в бокс через входную шахту шумоглушения, а отработавшие газы, пройдя через эжекторную выхлопную трубу, удаляются в атмосферу через выхлопную шахту.

В боксе на соответствующие испытательные станки установлены два двигателя – малоразмерный ТРД ТС-12, выполненный на базе турбостартера ТС-12, и ТВД ДГ-4М (рис. 1). Поскольку испытания обоих двигателей предполагают измерение силы тяги, станки выполнены нежесткими, с подвижной платформой, подвешенной к станине на упругих лентах. Для каждого двигателя предусмотрена своя станина и подвижная платформа. ТВД ДГ-4М (рис. 2, а) и ТРД ТС-12 (рис. 2, б) расположены на разных уровнях в целях экономии пространства.

С двигателем ДГ-4М с помощью эластичной муфты соединен генератор, который также устанавливается на подвижную платформу на двух стойках.

Стенд для испытаний двигателей ТС-12 и ДГ-4М оснащен собственными топливной, масляной, противопожарной и измерительной системами.

В ходе испытаний двигателей непосредственно измеряются статические давления, давления и температуры заторможенного потока в характерных сечениях проточной части испытуемого двигателя, тяга, частота вращения ротора,



В.А. Григорьев



П.Г. Зубков



Д.С. Калабухов

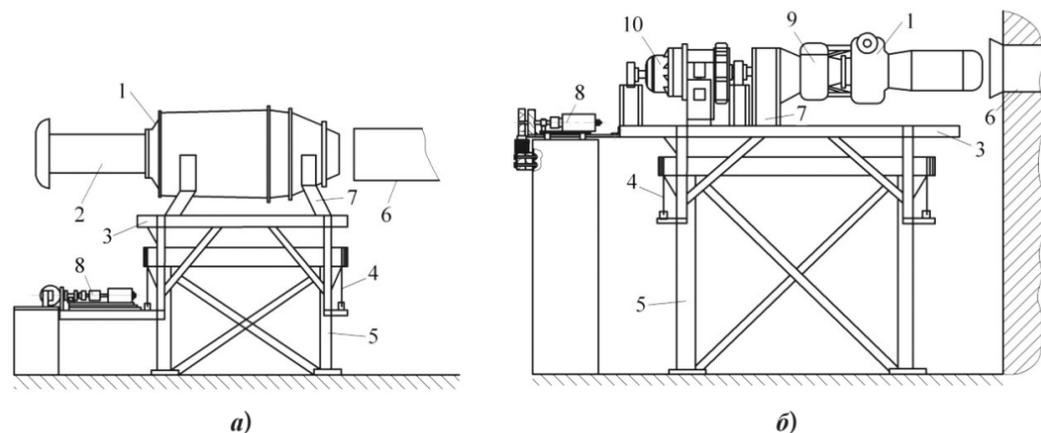


С.К. Бочкарёв

Рис. 1. Расположение установок для испытаний малоразмерных ТРД и ТВД в боксе: 1 – силоизмерительное устройство ТС-12; 2 – силоизмерительное устройство ДГ-4М



Рис. 2. Схема установок для испытаний ТС-12 (а) и ДГ-4М (б): 1 – двигатель; 2 – лемнискатный насадок; 3 – подвижная платформа; 4 – гибкие стальные ленты; 5 – станина станка; 6 – выхлопная труба; 7 – элементы крепления двигателя на стенде; 8 – силоизмерительный датчик; 9 – редуктор двигателя; 10 – электрический генератор



расход топлива. Расхода воздуха через двигателя определяется косвенным способом, путем измерения перепада между давлением заторможенного потока и статическим давлением на входе в компрессор. Крутящий момент на валу воздушного винта, развиваемый двигателем ДГ-4М, измеряется методом поглощения мощности с помощью электрического тормозного устройства, выполненного на базе генератора трехфазного тока С-75

В учебном процессе испытания двигателя ТС-12 проводят при проведении лабораторной работы «Определение параметров газового потока в проточной части ТРД» [3]. Основная цель работы – анализ термодинамического цикла ТРД с изменяемым сечением сопла и получение линии рабочих режимов экспериментальным путем для двух вариантов площади критического сечения сопла. Изменение площади критического сечения сопла

осуществляется с помощью специальных насадок.

При выполнении лабораторных работ по темам «Измерение крутящего момента при испытаниях ГТД» [4] и «Определение нормальных значений параметров турбовинтового двигателя средствами автоматизированной системы испытаний» [5] объектом испытаний является ДГ-4М. Нормальные значения параметров (НЗП) [5] здесь определяются путем задания режимов, подобных работе ТВД в стандартных атмосферных условиях (САУ), что соответствует случаю испытаний опытных двигателей.

### 2. Экспериментальная установка для испытаний ТРД АИ-25.

Установка размещается в боксе с габаритами 9х3х3 м. Помещение бокса отгорожено от бокса испытаний двигателей ТС-12 и ДГ-4М общей пультовой. При этом пульта управления АИ-25 и ДГ-4М (совместно с ТС-12) выполнены отдельно. Кроме АИ-25 в боксе стенда размещается ВГТД АИ-9 для запуска основного двигателя (рис. 3).

При испытании измеряются следующие параметры двигателя: тяга двигателя, расход топлива, температура топлива, расход воздуха, температуры и давления воздуха, газа, в различных сечениях двигателя, атмосферное давление, частоты

вращения роторов компрессоров низкого и высокого давления, величины вибрации двигателя.

Для измерения температур и давлений, характеризующих рабочий процесс в проточной части, двигатель препарирован соответствующими термо- и пневмогребенками. Температура на входе измеряется термометрами сопротивления, в остальных сечениях – термопарами. Для измерения давлений в системе используются измерительные преобразователи избыточного давления.

Расход воздуха определяется по измерениям перепада давлений на лемнискатной насадке, обеспечивающей безотрывное течение воздуха.

Для измерения расхода топлива используется кориолисовый расходомер массового типа. Данный расходомер подходит для измерения расхода малых количеств жидкостей и газов любого типа. Он обеспечивает высокую точность измерения не менее 0,1% от количества массового расхода.

Измерения силы тяги осуществляется с помощью силоизмерительного датчика, а частоты вращения роторов компрессора – тахометром.

Стенд используется при выполнении лабораторной работы «Автоматизированные испытания двухконтурного турборе-

Рис. 3. Расположение ТРД АИ-25 и ВГТД АИ-9 в боксе стенда



активного двигателя АИ-25» [6]. Ручным или автоматическим способом двигатель последовательно выводит на эксплуатационные режимы, соответствующие САУ, на каждом режиме осуществляется регистрация требуемых параметров для построения дроссельной характеристики. ИВК стенда позволяет привести параметры к САУ и построить приведенную дроссельную характеристику, с которой автоматизировано определяются НЗП с помощью специальной программы.

В пультной комнате расположены пульт управления и демонстрационные панели для визуализации процесса испытаний.

### 3. Стенд для высотно-климатических испытаний малоразмерных ТВД.

Стенд позволяет проводить испытания по определению дроссельных и климатических характеристик ТВД, пусковых характеристик ГТД и их камер сгорания, доводку узлов и т.д. В рамках учебного процесса проводятся испытания ТВД ДГ-4М в термобарокамере. Общий вид оборудования стенда изображен на рис. 4.

На рис. 5 показана схема бокса автоматизированного высотно-климатического стенда.

Стенд включает в себя следующие основные системы:

- система обеспечения высотно-климатических условий;

- термобарокамера с системой термостатирования топлива;
- системы управления, измерения и регистрации параметров.

Для создания кондиционированных условий в термобарокамере на стенде используется осушенный воздух высокого давления ( $p = 18 \cdot 10^3$  кПа), нагнетаемый в рампу баллонов компрессорной станцией 1. Блок осушки обеспечивает снижение влажности воздуха до точки росы  $-60^\circ\text{C}$ .

Для получения охлажденного воздуха при испытаниях используется турбодетандерная установка. В турбодетандере воздух, в зависимости от имитируемых условий охлаждается до заданной температуры и далее поступает в камеру смешения и ресивер. Через электрозадвижку перепуска в камеру смешения подается, минуя турбодетандер, воздух для регулирования температуры. В ресивере происходит выравнивание температуры воздуха, и он через электрозадвижку поступает в термобарокамеру к испытываемому двигателю.

При испытаниях с подогретым воздухом используются электрические калориферы 9 СФО-25 ( $\sum N_{эл} = 130$  кВт). Они обеспечивают чистый подогрев воздуха.

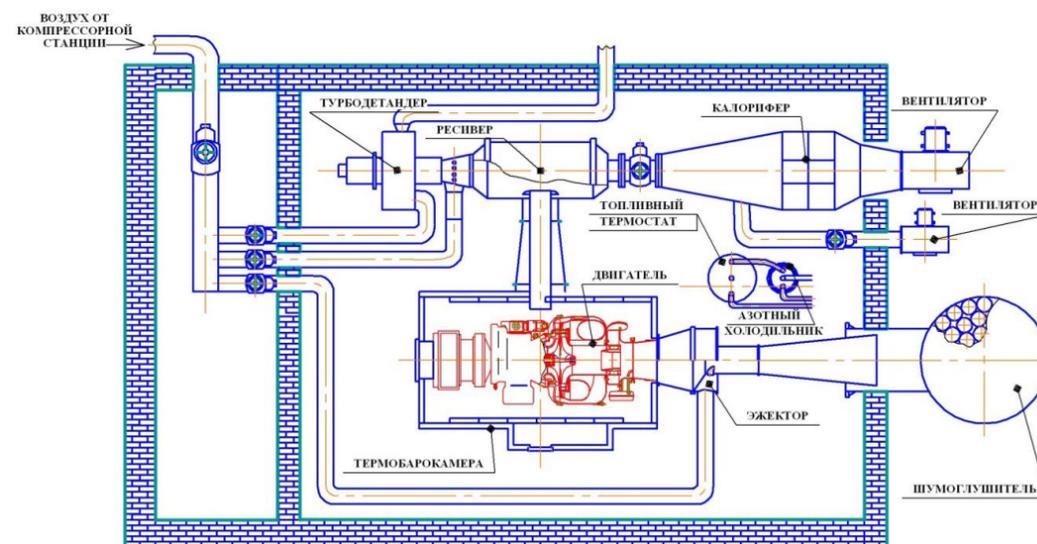
Выхлопные газы отводятся в башню шумоглушения.

В процессе испытаний на эксплуатационных режимах выполняются измерения

Рис. 4. Общий вид оборудования стенда высотно-климатических испытаний



Рис. 5. Схема бокса ВКС для испытаний двигателя ДГ-4М



основных параметров двигателя с помощью современных датчиков. Переход с одного режима на другой осуществляется путем изменения внешней нагрузки в диапазоне  $0 \dots 60$  кВт на электрогенераторе С-40. При этом частота вращения ротора  $n$  поддерживается постоянной с помощью изменения расхода топлива насосом-регулятором по заданной программе управления.

Нормальные значения параметров двигателя в таком случае должны определяться с помощью специальных коэффициентов пересчета и дроссельной характеристики. Для этого была разработана и внедрена в учебный процесс инновационная лабораторная работа [7]. В ходе ее выполнения автоматизировано осуществляется построение нагрузочной характеристики ДГ-4М.

Разработана и поставлена еще одна лабораторная работа [8], наглядно демонстрирующая студентам процесс испытания ГТД в термобарокамере. Двигатель испытывают в двух вариантах внешних условий: в САУ и при подогреве температуры наружного воздуха до  $323$  К ( $+50^\circ\text{C}$ ), на одинаковых режимах работы с поддержанием  $n = \text{const}$ . По результа-

там испытаний студенты строят совместную дроссельную характеристику для этих двух случаев и анализируют влияние температуры на основные технические данные ДГ-4М.

Таким образом, УИК кафедры ТДЛА позволяет студентам ознакомиться с особенностями подготовки и проведения испытаний ГТД, а также изучить вопросы термодинамического расчета и анализа результатов испытаний ГТД различных типов.

Рассмотренные экспериментальные стенды наряду с применением в учебном процессе в качестве лабораторных установок, используются магистрантами и аспирантами для решения научных задач, связанных с совершенствованием рабочего процесса в элементах ГТД, изучением влияния малоразмерности и характеристики ГТД, отработки новых методов приведения параметров ГТД к стандартным атмосферным условиям.

### Измерительно-вычислительный комплекс автоматизированной системы испытаний

Стендовый комплекс отвечает современным требованиям, что, в первую очередь, обусловлено высоким уровнем

автоматизации процесса испытаний и всех предпусковых операций.

Каждый стенд оснащен собственным ИВК. Структура построения каждого из них практически одинакова. ИВК представляет собой комплекс, включающий в себя центральную ЭВМ, периферийную ЭВМ, линии связи, программное обеспечение, систему сбора и обработки информации, получаемой при испытаниях. Она выполняет множество важных функций, связанных со сбором, обработкой и выдачей необходимой информации [9].

Каждый ИВК состоит из нижнего и верхнего уровней. На рис. 6 показана структурная схема ИВК.

Нижний уровень составляют датчики, исполнительные механизмы, пульт управления (на котором находится РУД с электроприводом на стендах для испытаний ТС-12, АИ-25 или система управления нагрузкой приводного генератора ВКС), контроллер, демонстрационные панели и автоматизированное рабочее место оператора.

Нижний уровень системы обеспечивает подготовку и проведение испытания, регистрацию и обработку параметров в реальном времени. Он функционирует в реальном времени и обеспечивает регистрацию параметров технологического процесса.

Верхний уровень представляет собой информационную подсистему, которая функционирует на базе локально вычислительной сети и включает сервер базы данных, автоматизированные рабочие места преподавателя и студентов, сервер видеонаблюдения. Он обеспечивает архивацию и проведение научно-технических расчетов, работу с видеоизображениями, обработку, приведение и представление результатов испытаний.

Все компьютеры подключаются к ЛВС с использованием стандартного сетевого адаптера через коммутатор Ethernet.

На сервере базы данных формируется база данных технологической информации АСИ двигателей ТС-12 и ДГ-4М,

Рис. 6. Блок-схема измерительно-вычислительного комплекса наземных стендов

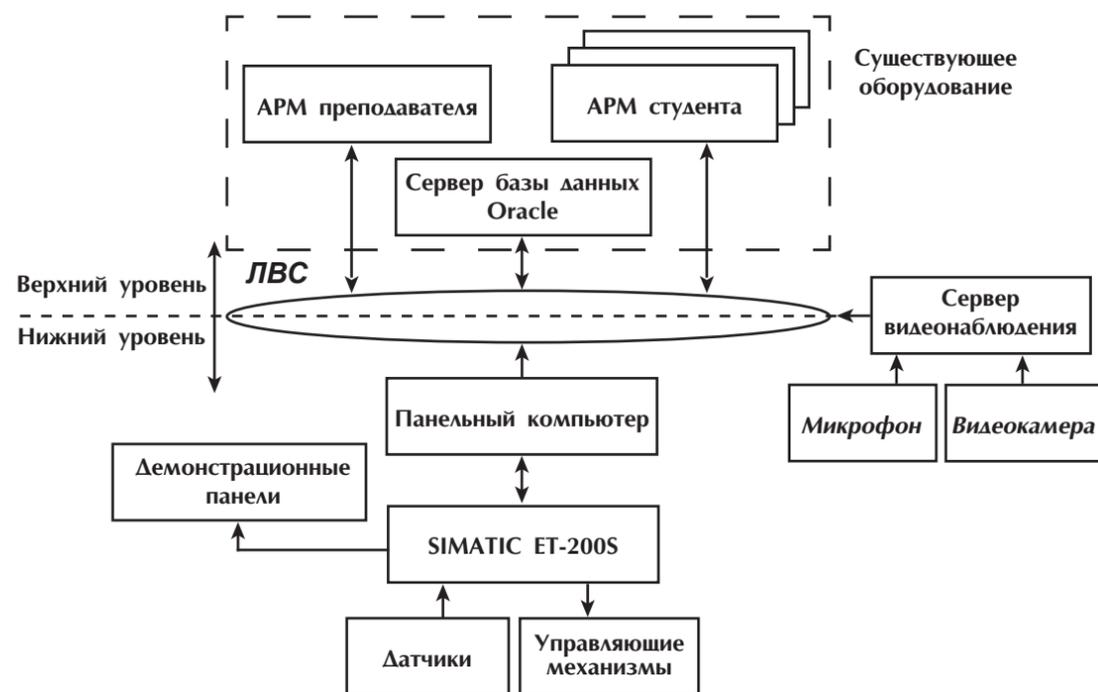
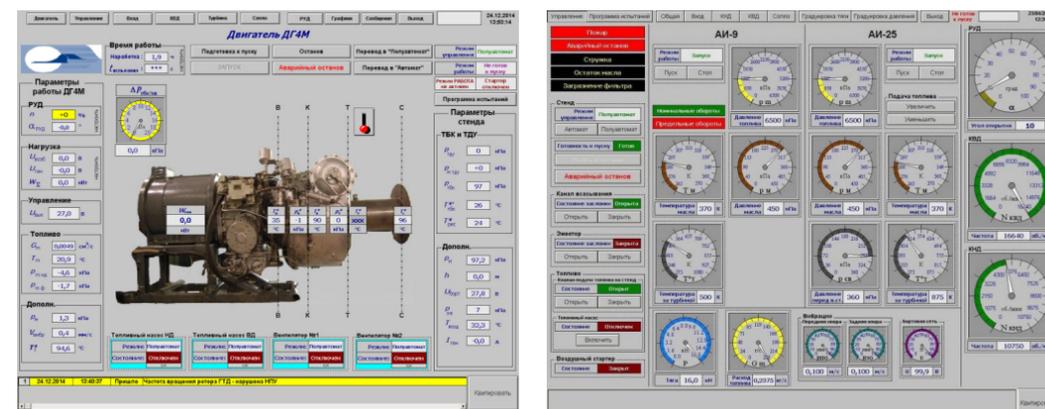


Рис. 7. Виртуальная панель контроля и управления в АСИ:  
а) ТВД ДГ-4М на ВКС; б) ТРАД АИ-25



а)

б)

АИ-25, поддерживается возможность конфигурирования базы данных и сопровождения архива значений параметров. Сбор и передача данных с АРМ оператора в архив на сервере осуществляется интерфейсным приложением.

Управление процессом подготовки, запуска и испытания двигателя осуществляется с пульта управления с использованием виртуальных манипуляторов (рис. 7) на дисплее автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора. Возможно как автоматическое управление по заданной программе АСИ при помощи управляемых контроллером исполнительных механизмов, так и управление в ручном режиме.

#### Заключение

Учебно-исследовательский комплекс для автоматизированных испытаний ГТД

основных типов, являющийся одним из наиболее наукоемких и высокотехнологичных лабораторных комплексов Самарского университета, предназначен для подготовки дипломированных специалистов, бакалавров, магистров и аспирантов в области авиадвигателестроения, а также технической эксплуатации авиационных двигателей и энергетических установок. В нем применяются современные средства обучения, наглядно демонстрирующие работу исследуемых объектов в широких диапазонах их рабочих режимов и внешних условий.

Использование высокоточных датчиков и вычислительной техники позволяет применять комплекс в системе открытого образования с возможностью удаленного управления процессом испытания и получения его результатов через сеть Internet.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, В.А. Стенд для высотно-климатических испытаний малоразмерных ГТД / В.А. Григорьев, П.Г. Зубков, А.С. Прокаев // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-технич. конф. – Самара: СГАУ, 2011. – Ч. 1. – С. 44-45.
2. ОСТ 1 01021-93. Стенды испытательные авиационных газотурбинных двигателей. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 22 с.
3. Калабухов, Д.С. Определение параметров рабочего тела в проточной части ТРД. Анализ его термодинамического цикла и экспериментальное получение линии рабочих режимов с изменяемым сечением сопла: метод. указ. к лаб. работе / Д.С. Калабухов, В.А. Григорьев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2015. – 44 с.
4. Измерение крутящего момента при испытаниях авиационных ГТД: метод. указ. к лаб. работе / Григорьев В.А. [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. нац. иссл. ун-та, 2016. – 24 с.
5. Калабухов, Д.С. Определение нормальных значений параметров турбовинтового двигателя средствами автоматизированной системы испытаний: метод. указ. к лаб. работе / Д.С. Калабухов, В.А. Григорьев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2015. – 48 с.
6. Автоматизированные испытания двухконтурного турбореактивного двигателя АИ-25: метод. указ. к лаб. работе / Григорьев В.А. [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. нац. иссл. ун-та, 2016. – 40 с.
7. Калабухов, Д.С. Применение коэффициентов пересчета для определения нормальных значений параметров турбовинтового двигателя по результатам измеренной дроссельной характеристики: метод. указ. к лаб. работе / Д.С. Калабухов, В.А. Григорьев, П.Г. Зубков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2015. – 40 с.
8. Калабухов, Д.С. Экспериментальное исследование в термобарокамере влияния температуры наружного воздуха на дроссельную характеристику турбовинтового двигателя: метод. указ. к лаб. работе / Д.С. Калабухов, В.А. Григорьев, П.Г. Зубков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2015. – 40 с.
9. Григорьев, В.А. Измерительно-вычислительный комплекс для автоматизации учебно-исследовательских испытаний и диагностики ТРДД / В.А. Григорьев, А.В. Лапшин, В.А. Киреев // Вестник двигателестроения: Научно-технический журнал. – 2008. – № 3. – С. 190-194.

УДК 378

## Формирование цифровых компетенций для научно-образовательной деятельности аспирантов

А.В. Путилов<sup>1</sup>, О.В. Нагорнов<sup>1</sup>, И.Н. Матицин<sup>1</sup>, О.А. Моисеева<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Пооступила в редакцию 02.08.2018

## Аннотация

Аспиранты как молодые будущие исследователи или преподаватели-исследователи должны обладать рядом дополнительных компетенций, которые позволят им развивать новые направления исследований и одновременно заниматься преподавательской деятельностью в сферах реального сектора экономики при масштабной цифровой трансформации реального сектора экономики. Предложен формат аспирантских школ и следует отметить дополнительные компетенции, которые могут быть сформированы в ходе прохождения обучения в аспирантских школах. По ходу обучения в аспирантской школе планируется несколько тестовых аттестаций, которые нужно пройти для успешного завершения курса школы, где целеполагание в цифровой экономике будет основным вопросом, а планирование достижения целей, в том числе и с помощью «дорожных карт» – дополнительным. Обработка и анализ больших данных: обучение в аспирантской школе будет сформировано таким образом, что обучающимся потребуется анализировать данные из лекций и практикумов, обзорных материалов, баз данных и прочее для получения ответов на вопросы при тестировании и итоговой аттестации. Самооценка и оценка успехов окружающих: аспирант сможет оценить свои успехи с помощью оценок за итоговую аттестацию. Помимо этого, при коллективной работе в аспирантской школе каждый обучающийся, после прохождения тестирований, сможет увидеть количество правильных ответов на вопросы при групповой работе, что необходимо для организации современных процессов коллективной работы в инженерной практике. Умение донести материал сложных понятий цифровой экономики в обобщенном виде до работодателя, других обучающихся, будущих потребителей цифровых товаров и услуг. При работе аспирантской школы для воспитания преподавателей-исследователей планируется сформировать четкое понимание цифровой экономики и ее «сквозных» технологий, основой для использования знаний, умений и навыков в реальном секторе экономики должно служить понимание технологической базы, которая доступна на данный момент.

**Ключевые слова:** аспирантура, цифровая экономика, аспирантские школы, новые компетенции, инновации в образовании.

**Key words:** graduate school, digital economy, graduate schools, new competencies, innovations in education.

## Введение.

Обучение в аспирантуре, как развитие третьего уровня высшего образования, должно быть скоординировано с изменениями, связанными с постепенным формированием цифровой экономики. У аспирантов как инженерных, так и экономических

направлений подготовки требуется сформировать знания и понятийную базу для дальнейшей научно-образовательной деятельности, а также привить навыки использования новых технологических подходов. Цифровая экономика представляет собой комбинацию новых технологий и новых



А.В. Путилов



О.В. Нагорнов



И.Н. Матицин



О.А. Моисеева