

А. А. Коева, П. В. Петров, В.А. Целищев

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ГИДРОЦИЛИНДРА

Рассматривается вопрос верификации математической модели силового гидроцилиндра по результатам проведенного эксперимента на стенде «Диагностика и идентификация гидросистем с комплектом гидрооборудования». Показана сходимость результатов численного исследования и эксперимента при различных сигналах управления подачи насоса. Также в статье представлена возможность получения более полных и исчерпывающих результатов в случае использования обобщенных теоретико-экспериментальных моделей. *Математическое моделирование; численный эксперимент, силовой гидроцилиндр; физический эксперимент; верификация*

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время численное моделирование стало неотъемлемой частью при разработке, совершенствовании и исследовании гидравлических систем. Достигнутый на данный момент уровень развития вычислительной техники, как по быстродействию, так и по объему оперативной памяти, и одновременно с этим широкое внедрение многопроцессорных систем позволяют реализовывать более сложные нелинейные математические модели гидромеханических устройств [1]. Таким образом, первоочередной задачей становится создание математических моделей и программ расчета, наиболее точно описывающих реально протекающие процессы в гидроавтоматических системах управления авиационных двигателей. Решение подобных задач в нелинейной постановке позволит в конечном итоге реализовать идею замены огневых стендовых испытаний регулируемых двигательных установок математическим моделированием на ЭВМ.

При моделировании таких сложных систем, как авиационный двигатель и его система управления, используют системный подход, при этом все элементы рассматриваются в совокупности отношений и связей между ними. Чтобы охарактеризовать и исследовать конкретное устройство, необходимо рассматривать каждый элемент этой системы индивидуально, независимо от системы.

Для исследования, анализа и синтеза систем общепринято использовать линейные методы, поскольку они обладают рядом достоинств, таких как универсальность, внутренняя непроти-

воречивость, наглядность и другие. Используя в данном случае линейную теорию, можно вполне точно судить о динамике всей системы. Систему в данном случае можно рассматривать как стационарную, работающую на установившемся режиме. Однако модели для отдельно взятых современных гидромеханических устройств являются, как правило, нелинейными и нестационарными и, к тому же, стохастическими. Кроме всего этого, устройства систем могут содержать не только естественные нелинейности (нечувствительность, насыщение, различного рода ограничения и пр.), но и искусственные, специально введенные для коррекции свойств или для динамического перестроения структуры. Аналитические методы в данном случае здесь будут неприемлемы. Наряду с этим, в настоящее время изменились приоритеты исследования – главной задачей исследователя становится не получение любой ценой решения в виде аналитического выражения, а преобразование исходных уравнений (в том числе аналитическими методами) к виду, удобному для ЭВМ, и последующий машинный анализ, позволяющий получить максимум полезных свойств из моделируемой системы.

### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Вычислительный эксперимент во многом аналогичен натурному. Он также состоит из последовательного проведения этапов, таких как планирование экспериментов, создание экспериментальной установки, проведение испытаний, обработка экспериментальных данных, их интерпретация и т. д. Однако вычислительный эксперимент проводится не над реальным объектом, а над его математической моделью, и роль экспериментальной установки играет оснащенная специально разработанной программой ЭВМ [2].

Контактная информация: (347) 273-09-44

Работа выполнена в ходе проведения НИР в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Сравнивая численный и физический эксперименты, приходим к выводу, что физический значительно дороже. Численный эксперимент обладает типичной для теории степенью гибкости, которая состоит в способности оценить влияние различных факторов, не прибегая к существенным изменениям в вычислительной модели. В тех случаях, когда физическое явление недостаточно изучено или реальный эксперимент трудно осуществить, математическое моделирование остается практически единственным средством. И, наконец, численный эксперимент является более прозрачным. Экспериментальные установки, даже построенные по единой принципиальной схеме, непременно имеют конструктивные, технологические и эксплуатационные особенности, которые в значительной степени определяют результаты опытов. Математические модели, алгоритмы и программы легко копируются, распространяются и воспроизводятся.

Однако при проведении исследований важно помнить, что численный эксперимент имеет свои ограничения, которые могут привести к неэффективным затратам времени и ресурсов, или даже к получению ошибочных результатов. Применимость результатов вычислительного эксперимента ограничена рамками принятой математической модели.

В действительности, численный эксперимент не может полностью заменить натурный, и будущее за их разумным сочетанием. Результаты натурного опыта являются фундаментом для построения теории, на основе которой создается математическая модель. И надежным критерием, подтверждающим достоверность ее выводов, опять же является практика [2]. Поэтому к результатам численного эксперимента необходимо подходить с известной осторожностью, особенно если в его основе лежит новая теория либо используемые параметры модели находятся на границе области ее применимости.

Научные исследования физических процессов можно проводить теоретически или экспериментально, независимо друг от друга. Такой вариант решения задачи носит односторонний характер. В современных условиях развития науки и техники стараются проводить комплексное исследование объекта. Этого можно добиться на основе новой, удовлетворяющей требованиям времени, методологии и технологии научных исследований.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом исследования в данной работе является силовой гидроцилиндр, применяемый в системах летательных аппаратов в качестве силовых элементов управления закрылками самолета, приводов ротации, управления поворотом сопла в авиационных двигателях и т. д.

Для правильного и эффективного функционирования всех систем управления летательным аппаратом необходимо осуществлять оптимальный выбор наиболее эффективных параметров гидроцилиндра [3]. Поэтому на предварительном этапе проектирования возникает необходимость математического моделирования, поскольку в этом случае появляется возможность предварительно оценить работу конкретного устройства, его поведение, а также влияние его характеристик на эффективность работы всей системы в целом на различных эксплуатационных режимах.

Таким образом, изначально необходимо разработать математическую модель системы управления гидроцилиндра, которая позволит исследовать динамику устройства, а соответственно, заранее отследить влияние основных факторов на изменение его параметров во времени. Исходя из этого, разрабатывается нелинейная математическая модель силового гидроцилиндра. Далее с целью подтверждения работоспособности разработанной модели, правильности выбора предварительных параметров и справедливости назначенных допущений осуществляется процесс верификации по результатам натурного эксперимента.

## 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Физические законы гидромеханики имеют довольно простую форму и выражают понятные условия баланса расходов и сил. Для расчета большинства устройств гидроавтоматики параметры можно считать сосредоточенными, а процессы описывать с помощью относительно простых обыкновенных дифференциальных уравнений. Однако в силу технологии инженерного исследования расходы и силы выражаются через другие непосредственно наблюдаемые и измеряемые величины (перемещение, скорость, давление, жесткость пружины, диаметр отверстия и т. д.), которые непосредственно используются в исследованиях.

При проведении численного исследования силового гидроцилиндра принимаются следующие допущения: волновые явления и существенные нелинейности (нечувствительность, насыщение и пр.) не рассматриваются; соблю-

дается условие неразрывности жидкости и закон Гука; трубопроводы считаются «короткими» (сосредоточенные параметры); присоединенная масса жидкости мала; потери в трубопроводах отсутствуют; люфт в подвижных соединениях отсутствует.

Динамическая математическая модель системы исследования гидроцилиндра состоит из следующих уравнений:

- уравнение движения поршня гидроцилиндра с массой:

$$\begin{aligned} (p_1 - p_2) \cdot F - k_v \cdot \frac{dy_p}{dt} - F_c \cdot \text{sign} \frac{dy_p}{dt} - \\ - R_n(y_p) = m \cdot \frac{d^2 y_p}{dt^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p_1$  – давление в нагнетательной полости гидроцилиндра;  $p_2$  – давление в сливной полости гидроцилиндра;  $F$  – площадь поршня гидроцилиндра;  $k_v$  – коэффициент вязкого трения;  $y_p$  – перемещение поршня гидроцилиндра;  $F_c$  – сила сухого трения;  $R_n(y_p)$  – функция пользователя определения нагрузки на гидроцилиндре;  $m$  – масса поршня с нагрузкой;

функция пользователя определения нагрузки на гидроцилиндре:

$$R_n(y_p) := \begin{cases} \text{if } y_{bn} < y_p < 1,3 \cdot y_{bn} \text{ then } 50 \cdot t \\ \text{if } y_p > 1,3 \cdot y_{bn} \text{ then } 500 \\ \text{else } 0 \\ \text{end} \end{cases}, \quad (2)$$

где  $y_{bn}$  – перемещение поршня гидроцилиндра при демпфировании;

- уравнение баланса расходов на входе в гидроцилиндр:

$$\begin{aligned} \mu \cdot b \cdot x \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_p - p_1|} \cdot \text{sign}(p_p - p_1) = \\ = F \cdot \frac{dy_p}{dt} + \frac{V_{10} + F \cdot y_p}{E} \cdot \frac{dp_1}{dt}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода;  $b$  – длина щели;  $x$  – ширина щели золотника гидрораспределителя;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости;  $p_p$  – давление питания;  $V_{10}$  – начальный объем в нагнетательной полости гидроцилиндра;  $E$  – модуль объемной упругости жидкости;

уравнение баланса расходов на выходе из гидроцилиндра:

$$\begin{aligned} F \cdot \frac{dy_p}{dt} = \mu \cdot b \cdot f_n(y_p) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_2|} \times \\ \times \text{sign}(p_2) + \frac{V_{20} - F \cdot y_p}{E} \cdot \frac{dp_2}{dt}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f_n(y_p)$  – функция пользователя определения площади открытия регулируемого дросселя, имитирующего нагрузку на гидроцилиндре;  $V_{20}$  – начальный объем в сливной полости гидроцилиндра;

функция пользователя определения площади открытия регулируемого дросселя:

$$f_n(y_p) := \begin{cases} \text{if } y_p < y_{bn} \text{ then } f_2 \\ \text{else } 4 \cdot 10^{-6} \\ \text{end} \end{cases}, \quad (5)$$

где  $f_2$  – площадь открытия регулируемого дросселя.

Верификация математической модели проводится по результатам натурального эксперимента на стенде «Диагностика и идентификация гидросистем с комплектом гидрооборудования».

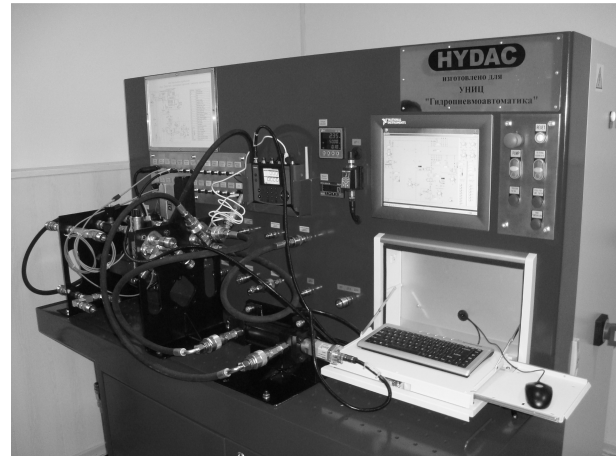


Рис. 1. Внешний вид экспериментального стенда

В рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы был модернизирован уникальный автоматизированный стенд «Диагностика и идентификация гидросистем с комплектом гидрооборудования» (рис. 1), предназначенный для проведения периодических, приемо-сдаточных и сертификационных испытаний гидроаппаратуры, с целью проведения физического эксперимента силового гидроцилиндра. Устройство испытывается на двух режимах: при постоянном рабочем объеме насоса 5 л/мин и 15 л/мин и настройке клапана 30 атм и при различных значениях перекрытия регулируемого дросселя и перемещении гидроцилиндра.

Экспериментальные исследования силового гидроцилиндра проводились для изучения особенностей его работы, проверки разработанных

методов расчета и выявления влияния на результаты расчета допущений, принятых при их составлении, а также для определения типовых динамических характеристик.

Для испытания силового гидроцилиндра была разработана схема (рис. 2), состоящая из насоса Н1, датчиков расхода ДР1 и ДР3, переливного клапана КП1, датчиков давления ДД4 и ДД5, гидрораспределителя ПР, гидроцилиндра ГЦ, нерегулируемого дросселя ДР, регулируемого дросселя ДРР и дросселирующего клапана КД1. Регулируемый дроссель используется для имитации нагрузки на цилиндре. Гидроцилиндр установлен параллельно гидрораспределителю, что позволяет осуществить реверс.

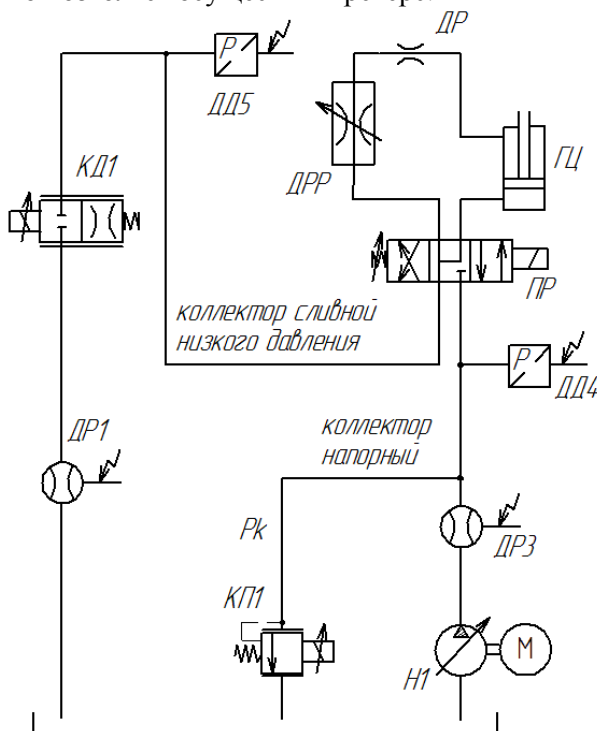


Рис. 2. Упрощенная схема проведения испытания

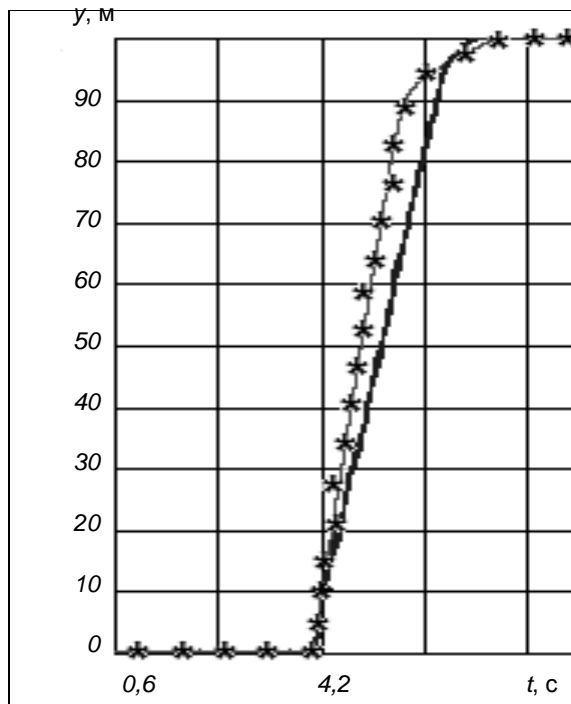
Верификация результатов численного и натурного экспериментов проводилась по динамическим характеристикам гидроцилиндра, т. е. по характеру изменения перемещения поршня гидроцилиндра во времени. На рис. 3, 5 изображены графики сравнения численных экспериментальных результатов на режиме работы силовой установки при постоянном рабочем объеме насоса 5 л/мин, и на рис. 4, 6 представлены результаты сравнения на режиме при рабочем объеме насоса 15 л/мин, настройка клапана на обоих режима одинакова и равна 30 атм.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования силового гидроцилиндра проводились для изучения особенностей его работы, проверки или верификации разработанных методов расчета и выявления влияния на результаты расчета допущений, принятых при их составлении. По переходным характеристикам перемещения силового гидроцилиндра (рис. 3–6) видно, что на двух режимах при увеличении открытия дросселя перемещение поршня гидроцилиндра происходит дольше, что обусловлено замедлением потока рабочей жидкости из-за увеличения площади проходного сечения. Также видно, что времени на перемещение поршня гидроцилиндра при сигнале управления регулятора подачи насоса 15% требуется меньше, чем при сигнале управления регулятора подачи насоса 5%, в связи с тем, что расход жидкости, а соответственно, и скорость течения, в первом случае больше. Анализ полученных результатов (рис. 3–6), оформленных в виде обобщенных теоретико-экспериментальных характеристик, показал, что расхождение значений теоретических и экспериментальных данных лежит в пределах 5–7%. Таким образом, разработанная математическая модель гидроцилиндра практически в полной мере адекватна реальному объекту. Из полученных данных можно установить, что разработанная математическая модель соответствует необходимому уровню точности для определения динамических характеристик с целью предконструкторского синтеза силового гидроцилиндра.

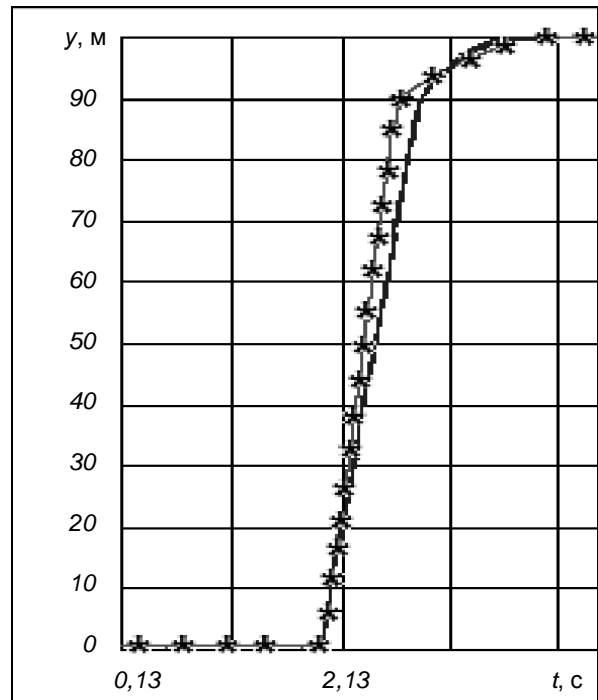
#### 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авиационный двигатель и его система управления представляют собой динамические системы со многими степенями свободы и содержат не только постоянные, но и переменные, нелинейные и распределенные параметры. Кроме этого, технические средства системы управления авиационного двигателя являются многофункциональными и обладают существенно перестраиваемой структурой. Вместе с этим, гидромеханическая система характеризуется относительно большим числом величин, которые принято делить на параметры состояния, т. е. переменные, зависящие от времени, и параметры, характеризующие физические свойства и условия работы. Таким образом, разработанная математическая модель для силового гидроцилиндра позволяет решить задачу исследования работы как составной части для одного из гидромеханических элементов сложной системы авиационного двигателя.

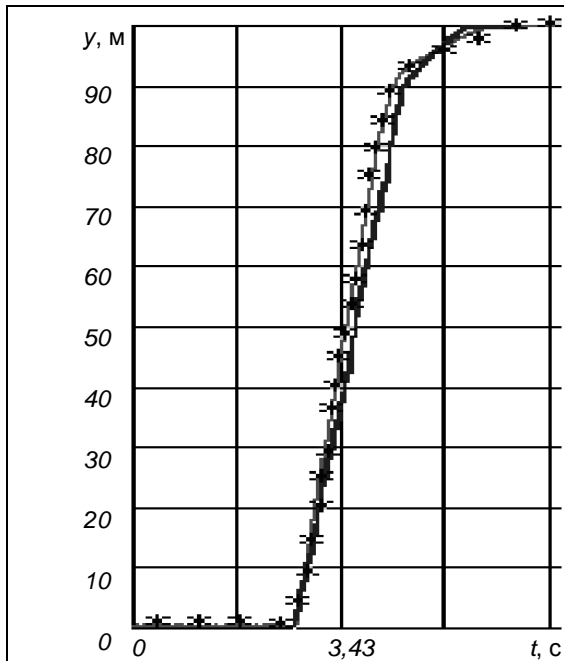


— Результаты вычислительного эксперимента  
 \*\*\*\*\* Результаты физического эксперимента  
 - - - - - Результаты аппроксимации физического эксперимента

**Рис. 3.** Перемещение поршня гидроцилиндра при сигнале управления регулятора подачи насоса 5% и открытии дросселя 40%

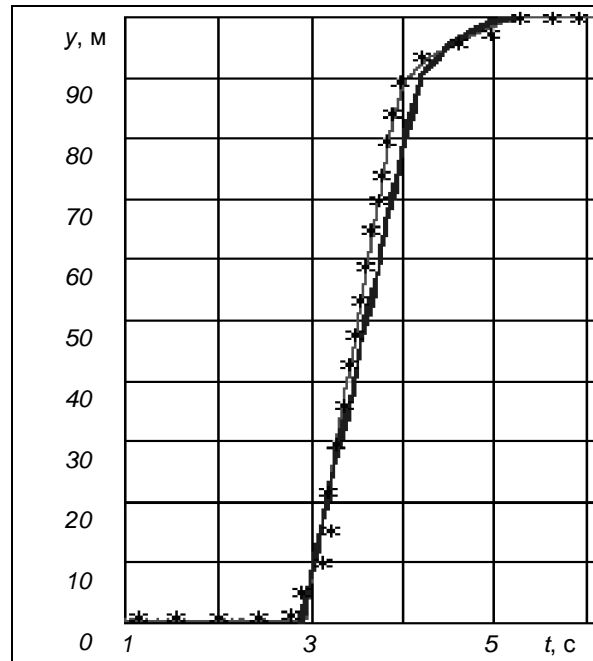


**Рис. 4.** Перемещение поршня гидроцилиндра при сигнале управления регулятора подачи насоса 15% и открытии дросселя 40%



— Результаты вычислительного эксперимента  
 \*\*\*\*\* Результаты физического эксперимента  
 - - - - - Результаты аппроксимации физического эксперимента

**Рис. 5.** Перемещение поршня гидроцилиндра при сигнале управления регулятора подачи насоса 5% и открытии дросселя 80%



**Рис. 6.** Перемещение поршня гидроцилиндра при сигнале управления регулятора подачи насоса 15% и открытии дросселя 80%

## ВЫВОДЫ

1. Разработанная математическая модель силового гидроцилиндра по результатам верификации с проведенным физическим экспериментом является адекватной, что говорит о возможности дальнейшего безошибочного применения результатов этой модели при проведении исследований.

2. Разработка нелинейных наиболее адекватных динамических моделей гидромеханических устройств с совместным применением вычислительной техники при их реализации позволяет значительно расширить круг инженерных исследований при проектировании, а также способствует существенному сокращению объема экспериментальных работ по доводке устройств на испытательном стенде, что в свою очередь приводит к снижению материальных затрат на разработку новых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сунарчин Р. А.** Выбор параметров гидромеханических регуляторов авиационных двигателей. Численные методы исследования: учеб. пособие для вузов. Уфа: УГАТУ, 2005. 120 с.
2. **Самарский А. А.** Компьютеры, модели, вычислительный эксперимент. Введение в информатику с позиций математического моделирования. М.: Наука, 1988. 176 с.
3. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов / Д. П. Попов [и др.]. М.: Машиностроение, 1978. 142 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Коева Анна Александровна**, асп. каф. прикл. гидромех. Дипл. магистр техники и технологии по гидравл., вакуум. и компрес. технике (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. моделирования и диагностики устройств гидроавтоматики.

**Петров Павел Валерьевич**, ст. преп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии по гидравл., вакуум. и компрес. технике (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по гидравл. машинам и гидропневмоагрег. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. гидромехан. систем автоматизации ЛА и двигательных установок.

**Целищев Владимир Александрович**, проф., зав. той же каф. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам, гидроприводам и гидропневмоавт. (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепл. двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматизации ЛА и двигательных установок.