

УДК 378:37.09:62  
DOI 10.20339/AM.06-23.046

**В.А. Костин\***,  
д-р техн. наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Прочности конструкций»  
Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева  
e-mail: VAKostin@kai.ru  
**Н.Л. Валитова**,  
канд. техн. наук, доцент  
кафедра прикладной математики и информатики  
Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева  
ORCID: 0000-0002-8408-1885

## РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ КАК НАУЧНАЯ ОСНОВА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Обратные задачи, в которых неизвестны коэффициенты уравнения, но известны начальные, граничные и другие дополнительные условия, образуют широкий класс так называемых коэффициентных обратных задач. В большинстве своем обратные задачи являются некорректными. Неустойчивость решения таких задач и ошибки численных методов приводят к росту результирующей погрешности в несколько раз в сравнении с входной погрешностью. Понятно, что умение найти устойчивое решение является критичным для специалиста, выполняющего различного рода диагностику.*

*Развитию прикладных обратных задач способствуют успехи современной измерительной и вычислительной техники. Еще недавно многие постановки обратных задач были невозможны, так как точности измерений и вычислительные мощности были недостаточны. В настоящее время становится возможным обработать большие объемы информации за короткое время, и в связи с этим технологии решения обратных задач стремительно развиваются. Этими технологиями также должен владеть современный специалист направления «Авиастроение».*

*Инициативная тематика предложенной статьи возникла на базе проводимых в лаборатории прочности сертификационных испытаний. Авторы предлагают новую для КНИТУ-КАИ дисциплину подготовки и повышения квалификации специалистов в области диагностики сложных технических систем, таких как авиационные конструкции.*

*Основная цель дисциплины – на основе научных методов базовой подготовки профильного технического вуза дать студентам необходимые компетенции, которые позволят обеспечивать в процессе эксплуатации необходимое техническое состояние воздушных судов согласно действующим нормам летной годности.*

**Ключевые слова:** подготовка специалистов, прочность авиаконструкций, обратные задачи, техническое состояние, авиастроение.

## INVERSE PROBLEMS SOLVING AS A SCIENTIFIC BASE FOR MONITORING AIRCRAFT TECHNICAL CONDITION

**Vladimir A. Kostin\***, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Head of the Department of Structural Strength in Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev, e-mail: VAKostin@kai.ru

**Natalia L. Valitova**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Informatics Kazan National Research Technical University n.a. A.N. Tupolev, ORCID: 0000-0002-8408-1885

*The inverse problems, when the coefficients of the equation are unknown, but the initial, boundary and other additional conditions are known, form a wide class of so-called coefficient inverse problems. Most of inverse problems are ill-posed. The instability of the solution of such problems and the errors of numerical methods lead to an increase in the resulting error by several times in comparison with the input error. It is clear that the ability to find a stable solution is critical for a specialist performing various kinds of diagnostics.*

*The progress of today's measuring and computing technology contributes to the development of applied inverse problems. Until recently, many formulations of inverse problems were impossible, since the measurement accuracy and computing power were insufficient. At present, it becomes possible to process large amounts of information in a short time, and in this regard, technologies for solving inverse problems are rapidly developing. These technologies should also be mastered by a modern specialist in the field of "Aircraft Engineering".*

*The proposed article is an initiative topic that arose on the basis of certification tests conducted in a strength laboratory. The authors propose a new discipline for KNIITU-KAI intended for training and professional development of specialists in the field of diagnostics of complex technical systems, such as aircraft structures.*

*The main goal of the discipline is to give students the necessary competencies on the foundation of scientific methods of basic education in a specialized technical university. Those competencies will allow them to ensure the necessary technical condition of aircraft during operation, in accordance with the current airworthiness standards.*

**Keywords:** training of specialists, strength of aircraft structures, inverse problems, technical condition, aircraft industry.

## Введение

Работая длительное время в лаборатории прочности и занимаясь наземными прочностными испытаниями вертолетов и самолетов, авторы пришли к выводу, что в подготовке современных специалистов направления «Авиастроение» существует пробел, не позволяющий «с ходу» включиться в обработку результатов экспериментов, когда появляется необходимость решать так называемые обратные задачи. Результат их решения – упругие характеристики конструкции – представляют большой интерес для теоретических прочностных расчетов, т.к. получены в качестве «отклика» реальной конструкции на известное силовое воздействие.

Аналогичные с точки зрения математики задачи возникают и при технической диагностике конструкций, когда вместо обходчика с молотком мониторинг их состояния современными системами сбора и обработки информации. Трудности математического характера преодолеваются и сегодня, но в основном на уровне кандидатских и докторских диссертаций, посвященных дальнейшей разработке теории решения некорректных задач, к которым относятся и обратные задачи. В нашем вузе по данной тематике написано 5 кандидатских и 1 докторская диссертации. Непосредственно авторами статьи опубликованы учебное пособие, монография и несколько статей в научных журналах [1–9]. Обратным задачам и методам их решения посвящено большое число работ других авторов, среди которых можно отметить [10; 11]. Считаем, что на этой научной основе можно создать курс, вводящий студентов в основные особенности постановки и приемы решения таких задач.

Необходимость такого курса важна, на наш взгляд, еще и потому, что за годы учебы в школе и в вузе обучаемые привыкли к решению прямых задач и их наглядной причинно-следственной связи. А здесь эта связь нарушена, – по следствию ищем причину, – и к такому образу мыслей тоже надо привыкнуть.

Если реализация и апробация курса пройдут успешно, мы планируем создать программу подготовки магистров направления «Авиастроение», связанную с более глубокой подготовкой в области обработки данных о состоянии сложных технических систем. В частности, предполагается учесть их стохастический характер, особенно на задачах на ресурс конструкций, где данный подход является естественным и единственным. Очевидно, что в рамках программы необходимо изучать стохастические методы обработки экспериментальных данных. Определенно, в программу также будут включены дисциплины, связанные и с математикой, и с материаловедением – например, такие как «Методы оптимизации», «Композиционные материалы» (крыло современного самолета А-350 состоит из композитов на 80%, фюзеляж – на 40%).

По словам главы Министерства науки и высшего образования РФ Фалькова В.Н. – в современном высшем образовании идет смена принципа «научим всех всему» на «научим тому, что необходимо, и тех, кто способен».

Конечно, создание целой программы – это далеко идущие планы. В данной статье мы осветим важность и концепцию лишь нового курса «Обратные задачи технической диагностики» для направления «Авиастроение».

## Основная часть

### Мотивация внедрения курса «Обратные задачи технической диагностики» в направление «Авиастроение»

В существующем учебном плане подготовки магистров по направлению «Авиастроение» присутствует дисциплина «Математическое моделирование и численные методы решения дифференциальных уравнений». Предполагается вместо нее читать дисциплину «Обратные задачи технической диагностики» и наполнять ее содержанием, ориентированным на решение задачи восстановления причин по известным проявлениям в поведении конструкции.

Студентам необходимо дать особенности решения задач в обратной постановке и привести примеры из расчета конструкций, когда это необходимо. Данная дисциплина может быть особенно востребована в случае целевой контрактной подготовки по заявкам предприятий. В этом случае приобретаемые новые компетенции наполняются очень конкретным содержанием и делают обучение студента более мотивированным. Согласно профессиональным стандартам, эти компетенции формулируются так:

- ♦ разработка теоретических моделей, позволяющих прогнозировать изменение технического состояния объектов авиационной и ракетно-космической техники (АРКТ) и динамику параметров эффективности ее технической эксплуатации;
- ♦ проведение анализа состояния и динамики объектов деятельности с использованием необходимых методов и средств анализа;
- ♦ разработка теоретических моделей для прогнозирования изменения технического состояния транспортного оборудования и для отслеживания параметров эффективности его технической эксплуатации.

Сегодня очевиден дефицит кадров, способных вести диагностику сложных технических систем. В частности, из-за санкций огромный парк самолетов Airbus, Boeing, Bombardier, оставшихся в России, не может обслуживаться представителями перечисленных фирм ни на нашей территории, ни за ее пределами. Поддержка технического состояния самолетов, в соответствии с требованиями российских и международных стандартов летной годности, должна обеспечиваться ответственными специалистами, в том числе теми, кто отвечает за этап диагностики (планер, двигатель, авионика).

Важной частью подготовки и переподготовки персонала, занятого в этой области, является получение компетенций в об-

ласти измерений и обработки полученных результатов. И если выпускники технического вуза, как правило, быстро осваивают работу с любой сложной измерительной аппаратурой, то в области обработки информации есть проблемы, поскольку приходится решать задачи по «отклику», а это как раз то, что они «не проходили» и что им «не задавали» – т.е. обратные задачи. Таким образом, обучая специалистов, вуз со временем становится центром не только подготовки, но и повышения квалификации в очень важной и перспективной области знаний.

### Релевантные российские образовательные практики

Аналогичные курсы по обратным задачам читаются многими ведущими учебными заведениями страны. Далее приводим список университетов и курсов, где есть разделы, посвященные обратным задачам:

Город	Вуз	Название курса	Обучающиеся
Москва	МГУ имени Ломоносова	Введение в теорию обратных задач	Нет данных
Москва	МГТУ им. Баумана	Теория и методы решения обратных задач	9-й семестр или первый семестр магистратуры
Екатеринбург	Уральский федеральный университет	Специальные главы высшей математики	Программы: 140800.68 «Ядерная физика и технологии», 201000.68 «Биотехнические системы и технологии». Специальность 140801.65 «Электроника и автоматика физических установок»
Красноярск	Сибирский федеральный университет	Обратные задачи математической физики	Программа магистерской подготовки 010500.68.01 «Математическая физика» направления 010500.68 «Прикладная математика и информатика»
Воронеж	Воронежский государственный университет	Теория корректных и некорректных задач	Нет данных
Пермь	Пермский государственный университет	Теория корректных и некорректных задач	4-й курс механико-математического факультета

Однако читаемые коллегами курсы (видимо, за исключением МГТУ им. Баумана) посвящены в основном задачам физики и биологии, связанным с микромиром. Предлагаемый нами курс направлен на оценивание состояния макрообъектов, т.е. летательных аппаратов.

### Структура курса «Обратные задачи технической диагностики» и план его реализации

На данный момент предполагается, что курс будет состоять из шести теоретических модулей и лабораторных работ

к каждому модулю. Первый модуль будет играть роль введения в теорию обратных задач вообще и авиастроения в частности. Он будет посвящен общим вопросам теории. Здесь же будет дана общая характеристика обратных задач прочности на примере авиационных конструкций, будут приведены различные математические модели конструкций, а также методы дискретизации непрерывных моделей, используемые для численного решения задач прочности, а именно – метод конечных элементов и метод интегрирующих матриц.

Во втором модуле будут рассматриваться вопросы корректности постановок обратных задач и будет дан обзор методов решения некорректно поставленных задач – поскольку некорректность значительно усложняет решение обратных задач и требует специальных методов приведения их к классу корректных.

В третьем модуле будет рассмотрено непосредственное решение задач идентификации:

- 1) восстановление распределенной нагрузки, действующей на летательный аппарат, на базе балочной модели;
- 2) определение переменных параметров упругости элементов тонкостенной конструкции;
- 3) двумерная задача идентификации поля жесткостей пластин для модели ортотропной (изотропной) пластины.

В четвертом модуле будут изучаться возможности метода регуляризации по А.Н. Тихонову для «плохо» обусловленных задач.

Пятый модуль будет посвящен решению обратных задач прочности тонкостенных конструкций в экстремальной постановке. Здесь будет рассмотрена задача восстановления переменных параметров упругости тонкостенной конструкции.

Адаптация к соответствующим задачам мониторинга конструкций требует, по существу, и коррекции создаваемого и существующего программного обеспечения. Поэтому в шестом модуле будут изучаться компьютерные системы, применяемые для решения различного рода инженерных задач.

Для реализации плана создания курса «Обратные задачи технической диагностики» необходимо пройти несколько этапов. По нашему мнению, они могли бы быть следующими.

1. Изучение существующих реализаций образовательных курсов по решению обратных задач в отечественных и зарубежных вузах (МГУ, МГТУ им. Баумана, Уральский федеральный университет, Сибирский федеральный университет, Воронежский государственный университет и др.).
2. Анализ и сравнение учебных планов и рабочих программ по дисциплине «Обратные задачи».
3. Разработка структуры и содержания учебного курса «Обратные задачи технической диагностики».
4. Разработка контента лекционного курса и лабораторных работ на базе существующих статей и научных работ сотрудников КНИТУ-КАИ.
5. Создание учебно-методических материалов к курсу.

6. Апробация разработанного курса в учебном процессе. В случае если такой курс будет внедрен в какую-либо программу дополнительного образования, тогда к плану выше добавится этап создания онлайн-курса в одной из систем управления обучением или открытых образовательных платформ (Moodle, Blackboard, Степик и др.).

## Заключение

По мнению авторов, курс «Обратные задачи технической диагностики» является актуальным, в определенной степени новым и весьма востребованным.

Актуальность вышеизложенной программы курса заключается в потребности мониторинга технического состояния сложных технических систем — это авиация, космос, энергетика и большие технические сооружения. Пренебрежение таким исследованием может приводить

## Литература

1. Костин В.А., Валитова Н.Л. Теория и практика прочностной отработки конструкций летательных аппаратов: монография. Казань, 2014.
2. Костин В.А., Хуан Ш., Валитова Н.Л. Применение дискретно-континуальной модели расчета на прочность для решения задачи идентификации теплонагруженной конструкции // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 3. С. 3–7.
3. Костин В.А., Хуан Ш., Валитова Н.Л. Численные методы анализа чувствительности в задачах идентификации конструкций // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 78–83.
4. Хуан Ш., Костин В.А. О выборе расчетной модели для задачи идентификации жесткости // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 2. С. 124–130.
5. Костин В.А., Валитова Н.Л. Восстановление модулей сдвига панелей обшивки четырехлопастного квадратного кессона, нагруженного крутящим моментом // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов. 2015. С. 2020–2022.
6. Костин В.А., Герасимов А.И. Расчет выбора параметров силовых воздействий на хвостовую балку вертолета при наземных испытаниях // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 1. С. 5–7.
7. Костин В.А., Валитова Н.Л. О коэффициентах уравнений равновесия при решении задачи восстановления диаграмм деформирования слабоконических тонкостенных конструкций // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2007. № 3. С. 8–11.
8. Хуан Ш., Костин В.А., Лаптева Е.Ю. Применение метода анализа чувствительности для решения обратной задачи ползучести кессона конструкции на основе модели суперэлементов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3.
9. Валитова Н.Л., Костин В.А. О применении вероятностных методов к решению коэффициентных обратных задач прочности летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 4. С. 42–50.
10. Алифанов О.М., Иванов М.А., Колесников В.А., Меднов А.Г. Определение температурных зависимостей теплофизических характеристик анизотропных материалов из решения обратной задачи // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 247–254.
11. Алифанов О.М., Вабیشهвич П.Н., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В., Полежаев Ю.В., Резник С.В. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: уч. пос. М.: Логос. 2001. 400 с.

к техногенным катастрофам. Для мониторинга состояния необходимы специалисты, ориентированные на сбор данных и анализ технического состояния конструкции, а также способные проводить математическое моделирование процесса и расчеты.

Новизна преподаваемого материала курса состоит в использовании результатов исследований, изложенных в последних кандидатских диссертациях, прошедших экспертизу и одобренных научным сообществом (ВАК, ЦАГИ).

Востребованность же курса по обратным задачам технической диагностики обусловлена возрастанием количества сложных и ответственных технических систем, состояние которых требует постоянного анализа их реакции на возмущение окружающей среды. Например, норвежцы для анализа состояния нефтегазовых платформ используют до 50 тыс. датчиков, сигналы от которых подвергаются непрерывному анализу.

## References

1. Kostin, V.A., Valitova, N.L. Theory and practice of strength development of aircraft structures. Monograph. Kazan, 2014.
2. Kostin, V.A., Huang, S., Valitova, N.L. Application of a discrete-continuous model of strength analysis to solve the identification problem of a thermally loaded structure. *Russian Aeronautics*. 2017. Vol. 60. No. 3. P. 321–326. DOI: 10.3103/S1068799817030011.
3. Kostin, V.A., Huang, S., Valitova, N.L. Numerical Methods for Sensitivity Analysis in Problems of Design Identification. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2017. Vol. 73. No. 1. P. 78–83. (In Rus.)
4. Huang, Sh., Kostin, V.A. On the choice of a calculation model for the stiffness identification problem. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2017. Vol. 73. No. 2. P. 124–130. (In Rus.)
5. Kostin, V.A., Valitova, N.L. Shear Modulus Reconstruction for Skin Panels of a Four-Stiffener Square Torsion Box Loaded by Torque. *Proc. XI All-Russian Congress on Basic Problems of Theoretical and Applied Mechanics*. Kazan, 2015. P. 2019–2021. (In Rus.)
6. Kostin, V.A., Gerasimov, A.I. Calculation of the choice of parameters of force effects on the helicopter tail boom during ground tests. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2013. No. 1. P. 5–7. (In Rus.)
7. Kostin, V.A., Valitova, N.L. Coefficients of equilibrium equations in solving a problem of reconstructing deformation curves for slightly conical thin-walled structures. *Russian Aeronautics*. 2007. Vol. 50. P. 243–247. DOI: 10.3103/S1068799807030026.
8. Huang, S., Kostin, V.A., Lapteva, E.Y. Application of the sensitivity analysis method for the solution of the inverse creep problem of a wingbox structure on the basis of super-element model. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta [Aerospace MAI Journal]*. 2018. Vol. 25. No. 3. (In Rus.)
9. Valitova, N.L., Kostin, V.A. On probabilistic methods application to solving aircraft strength inverse coefficient problems. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta [Aerospace MAI Journal]*. 2019. Vol. 26. No. 4. P. 42–50. (In Rus.)
10. Alifanov, O.M., Ivanov, M.A., Kolesnikov, V.A., Mednov, A.G. A technique to evaluate temperature dependences of thermal and physical characteristics for anisotropic materials basing on an inverse problem solution. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta [Aerospace MAI Journal]*. 2009. Vol. 16. No. 5. P. 247–254. (In Rus.)
11. Alifanov, O.M., Vabishchevich, P.N., Mikhailov, V.V., Nenarokomov, A.V., Polezhaev, Yu.V., Reznik, S.V. Fundamentals of identification and design of thermal processes and systems. Textbook. Moscow: Logos, 2001, 400 p.