

**ФОРМА 2. КВАЛИФИКАЦИЯ, ОПЫТ РАБОТЫ И НАУЧНЫЕ  
ДОСТИЖЕНИЯ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА**

(регистрационный номер заявки 9.1022.2017/ПЧ )

**Личные данные**

Фамилия	<u>Глушков</u>
Имя	<u>Евгений</u>
Отчество	<u>Викторович</u>
Дата рождения	<u>18.05.1953</u>
Гражданство	<u>РОССИЯ</u>
Номер личного кабинета в Карте российской науки	<u>00022818</u>
Телефон	<u>8-918-3998823</u>
E-mail	<u>evg@math.kubsu.ru</u>

**Образование**

Образование, наименование вуза и год окончания обучения	<u>высшее профессиональное, Ростовский Государственный университет, 1975</u>
Ученая степень	<u>доктор физико-математических наук</u>
Ученое звание	<u>профессор</u>

**Место работы**

Полное наименование организации	<u>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет»</u>
Должность	<u>главный научный сотрудник</u>
Приказ о назначении на должность	<u>-</u>
Регион	<u>Краснодарский край</u>
Почтовый адрес	<u>350040, г. Краснодар, ул. Ставропольская, д. 149</u>
Телефон	<u>8-918-3998823</u>
E-mail	<u>evg@math.kubsu.ru</u>
Факс	<u>-</u>

**Наукометрические показатели**

Область научных интересов Математика

Индекс Хирша

А) по базе данных «Сеть науки» (Web of Science) 6

Б) по базе данных MathSciNet 3

В) по базе данных Scopus 8

Число публикаций, индексируемых

А) в базе данных «Сеть науки» (Web of Science) 33

Б) в базе данных MathSciNet 22

В) по базе данных Scopus 44

Средневзвешенный импакт-фактор изданий, в которых были опубликованы статьи 0.83

Число цитирований статей, индексируемых

А) в базе данных «Сеть науки» (Web of Science) 134

Б) в базе данных MathSciNet 11

В) по базе данных Scopus 173

Среднее число цитирований в расчете на одну публикацию

А) в базе данных «Сеть науки» (Web of Science) 2.00

Б) в базе данных MathSciNet 0.50

В) по базе данных Scopus 2.51

Число публикаций за последние пять лет в изданиях, индексируемых

А) в базе данных «Сеть науки» (Web of Science) 25

Б) в базе данных MathSciNet 4

В) по базе данных Scopus 26

Средневзвешенный импакт-фактор изданий, в которых были опубликованы статьи за последние пять лет 1.61

## Научные достижения

### *Научная деятельность, основные научные достижения*

Окончил механико-математический факультет Ростовского госуниверситета (РГУ) в 1975 г. по специальности математик. С 1975 по 1983 год работал в НИИ механики и прикладной математики РГУ, начиная с должности младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией. В 1983 г. приказом Минвуза лаборатория была переведена в Краснодар, в Кубанский госуниверситет (КубГУ), где составила основу проблемной научно-исследовательской лаборатории (ПНИЛ), преобразованной в дальнейшем в Кубанский филиал НИИ механики и прикладной математики (в настоящее время – Институт математики, механики и информатики – ИММИ КубГУ). Одним из главных направлений научно-исследовательской работы ПНИЛ было решение актуальных задач моделирования волновых и динамических явлений, в том числе и в рамках спецтематики. Наряду с выполнением государственных заданий по НИР, перед лабораторией была также поставлена задача формирования научно-учебного комплекса для широкого привлечения студентов и аспирантов математических специальностей к научной работе по данной тематике.

Основная область научных интересов – волновые задачи математической физики, динамической теории упругости и физической акустики. Научная деятельность сосредоточена на разработке полуаналитических методов их решения, создании на этой основе эффективных вычислительных алгоритмов, их реализации в виде малозатратных компьютерных моделей и проведении анализа динамической реакции и формирования волновых полей в волноводных структурах и средах сложного строения. Особое внимание при этом уделяется изучению эффектов и явлений, обусловленных математическими особенностями решения, такими как распределение полюсов в комплексной плоскости частоты, спектральные свойства интегральных операторов, выход точек дискретного спектра задачи на вещественную ось и появление ловушечных мод, характер сингулярности решения в угловых точках и вершинах пространственных многогранных углов и др.

В отличие от широко распространенного в настоящее время компьютерного моделирования на основе сеточной аппроксимации (метод конечных элементов или конечных разностей), численный анализ проводится в рамках интегрального подхода, базирующегося на использовании явных интегральных представлений (фундаментальные решения, матрицы Грина, слоистые элементы) и полученных из них асимптотик. Такой подход позволяет существенно снизить вычислительные издержки, выявить волновую структуру решения и изучить тонкие волновые и энергетические эффекты, трудно различимые в суммарном массиве числовых данных. Цикл работ по развитию данного подхода, разрабатываемого в составе коллектива авторов в традициях Южно-российской механико-математической школы Воровича-Бабешко, был отмечен Государственной премией Российской Федерации по науке и технике за 2001 год.

Характерной особенностью научной работы является активное развитие международного научного сотрудничества. Во многом благодаря курсу на его интенсивное развитие и участие в конкурсах проектов международных научных фондов удалось сохранить ядро исследовательской группы и обеспечить преемственность НИР и учебной работы в трудные 90-е годы. Были получены гранты таких зарубежных научных фондов, как Лондонское математическое общество (1998), Немецкое научное общество (DFG: 1997-1999, 2000, 2008, 2010-2011), фонд CRDF, США (2001-2003), Нидерландское научное общество (NWO: 2002-2004), NATO Science Programme (2003, 2013), INTAS (2006-2009). В настоящее время успешно развивается научная кооперация с исследовательскими группами университетов Гетеборга (Швеция), Гамбурга, Зигена и Карлсруэ (Германия), Бордо (Франция). Подписан Меморандум о научном сотрудничестве с Университетом Южной Каролины (США). Проводятся совместные исследования, результаты которых публикуются в высокорейтинговых международных научных изданиях (J. Acoust. Soc. Am., Smart. Mat. Struct., J. Sound Vibr., Int. Mat. Struct., Wave Motion и др.) и докладываются на авторитетных отечественных и международных научных форумах. При поддержке как европейских научных фондов (DFG, DAAD, Swedish Institute), так и в рамках совместной российско-германской программы «Михаил Ломоносов», на регулярной основе организованы рабочие поездки аспирантов и

молодых сотрудников в указанные научные центры, что позволило использовать преимущества международной научной кооперации (проверка разрабатываемых теоретических моделей на современном экспериментальном оборудовании партнеров, доступ к передовой научно-технической информации и технологии, апробация результатов мировым экспертным сообществом и др.).

Достигнутый уровень сотрудничества с группами проф. Р. Ламмеринга (Prof. R. Lammering, Hamburg, Germany), и В. Жиурджитцу (V. Giurgiutiu, University of South Caroline, USA), позволил подготовить детальный рабочий план трехстороннего (США-Германия-Россия) международного проекта в рамках научно-исследовательской программы НАТО "Наука для мира и безопасности" (NATO Science for Peace and Security Programme). Область исследований – создание математических и компьютерных моделей и проведение экспериментальных исследований для создания систем активной диагностики состояния изделий и систем ответственного назначения с помощью бегущих упругих волн. Разработанная рабочая программа была представлена тремя со-руководителями и успешно защищена на специальном заседании отборочной комиссии в Брюсселе в феврале 2014 года. Было одобрено финансирование на 2014-2016 годы общим объемом 388 000 Евро (180 000 Евро для ИММИ КубГУ), однако из-за событий на Украине проект был приостановлен, а финансирование заморожено.

Основные научные достижения за последние пять лет (2010-2015 годы):

1. Анализ распределения точек спектра краевых задач и связанных с ним эффектов резонансного пропускания, блокирования или захвата энергии бегущих волн при их дифракции на одиночных и множественных препятствиях различного вида [1,7,11,12,16]. Экспериментальное подтверждение резонансного прохождения и захвата энергии на теоретически предсказанных частотах для препятствий в виде внутреннего отслоения [7] и поверхностной выемки [1,2]. Анализ закономерностей распределения почти вещественных точек спектра рассматриваемых краевых задач в комплексной плоскости частоты и соответствующего формирования полос запираения и пропускания при дифракции на множественных препятствиях [11,12,16].

2. Анализ закономерностей возбуждения поверхностных акустических волн (ПАВ) в структурах с пленочным пьезоэлектрическим покрытием на алмазной подложке. Подтверждение вырождения псевдоповерхностной волны Сезавы в поверхностную бегущую волну, получающуюся при выходе полюса Фурье-символа на вещественную ось. Обнаружение аналогичного явления у высших мод [8].

3. Разработка и компьютерная реализация эффективного алгоритма построения матрицы Грина для многослойной композитной структуры с произвольной анизотропией упругих свойств, а также асимптотического представления для квазицилиндрических бегущих волн, возбуждаемых в ней динамической поверхностной нагрузкой [13,19]. Анализ на этой основе характерных особенностей частотно-зависимой направленности излучения бегущих волн и угловой зависимости вектора групповой скорости с экспериментальной проверкой полученных результатов и выявленных эффектов [5,9].

4. Разработка, практическая реализация и экспериментальная проверка методики решения плохо обусловленной обратной задачи определения эффективных упругих констант слоистого композита по характеристикам возбуждаемых в нем бегущих волн [3].

5. Развитие метода слоистых элементов (МСЭ), основанного на использовании в качестве базисных функций фундаментальных решений для рассматриваемой слоистой структуры в целом. Анализ с помощью МСЭ дифракции бегущих волн, возбуждаемых пьезоактуатором, на пространственных поверхностных препятствиях [15] и прямоугольных канавках [2]. Экспериментальное подтверждение эффектов, предсказанных математически [1,2,7,15,17].

6. Исследование эффекта низкочастотной аномальной прозрачности границы вода-воздух для волновой энергии, излучаемой точечным источником, и его подтверждение для случая объемного сферического источника [5].

7. Анализ влияния неоднородности и пористости на дисперсионные и амплитудно-частотные характеристики возбуждаемых бегущих волн и на распределение между ними энергии, поступающей в среду от поверхностного источника, в волноводах с произвольной функционально-градиентной зависимостью упругих свойств от глубины [3,4], а также для пористых флюидонасыщенных материалов [13]. Обнаружение эффекта эстафетной передачи энергии между модами [4].

8. Определение оптимальных режимов возбуждения бегущих волн методом максимальной контрастности и разработка на этой основе алгоритма расчета параметров селективного возбуждения требуемых мод системой кольцевых пьезоактуаторов [18].

## Список цитируемых публикаций:

1. Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Lammering R. Trapped mode effects in notched plate-like structures // *Journal of Sound and Vibration*, 2015, Vol. 358, P. 142–151.
2. Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Giurgiutiu V. Low-cost simulation of guided wave propagation in notched plate-like structures // *Journal of Sound and Vibration*, 2015, Vol. 352, P. 80-91.
3. A.A. Eremin, E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, R. Lammering, Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser Doppler vibrometry, *Composite Structures*, 2015, Vol. 125, P. 449–458.
4. Glushkov E., Glushkova N., Fomenko S. Wave energy transfer in elastic half-spaces with soft interlayers // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, Vol. 137(4), P. 1802-1812.
5. Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Lammering R. Group velocity of cylindrical guided waves in anisotropic laminate composites // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, Vol. 135(1), P. 148-154.
6. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Godin O.A. The effect of anomalous transparency of the water-air interface for a volumetric sound source // *Acoustical Physics*, 2013, Vol. 59(1), P. 6-15.
7. Glushkov E., Glushkova N., Golub M.V., Moll J., Fritzen C.-P. Wave energy trapping and localization in a plate with a delamination // *Smart Materials and Structures*, 2012, Vol. 21(12), Article number 125001, 12 pp.
8. Glushkov E., Glushkova N., Zhang C. Surface and pseudo-surface acoustic waves piezoelectrically excited in diamond-based structures // *Journal of Applied Physics Volume*, 2012, Vol. 112(6), Article number 064911, 10 pp.
9. Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Lammering R., Neumann M. Frequency dependent directivity of guided waves excited by circular transducers in anisotropic composite plates // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, Vol. 132(2), P. EL119-EL124.
10. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Fomenko S.I., Zhang C. Surface waves in materials with functionally gradient coatings // *Acoustical Physics*, 2012, Vol. 58(3), P. 339-353.
11. Glushkov E., Glushkova N., Golub M., Eremin A. Resonance blocking and passing effects in two-dimensional elastic waveguides with obstacles // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, Vol. 130(1), P. 113-121.
12. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Wauer J. Formation of frequency pass and gap bands in an elastic waveguide with a system of obstacles // *Acoustical Physics*, 2011, Vol. 57(3), P. 281-291.
13. Glushkov E., Glushkova N., Eremin A. Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites // *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, Vol. 129(5), P. 2923-2934.
14. Glushkov E.V., Glushkova N.V., Fomenko S.I. Influence of porosity on characteristics of rayleigh-type waves in multilayered half-space // *Acoustical Physics*, 2011, Vol. 57(2), P. 230-240.
15. Glushkov E., Glushkova N., Lammering R., Eremin A., Neumann M.N. Lamb wave excitation and propagation in elastic plates with surface obstacles: Proper choice of central frequencies // *Smart Materials and Structures*, 2011, Vol. 20(1), Article number 015020, 11 pp.
16. Glushkov E., Glushkova N., Wauer J. Wave propagation in an elastically supported string with point-wise defects: Gap-band and pass-band effects // *ZAMM Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*, 2011, Vol 91(1), P. 4-22.
17. E. Glushkov, N. Glushkova, O. Kvasha, D. Kern, and W. Seemann, Guided wave generation and sensing in an elastic beam using MFC piezoelectric elements: theory and experiment // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2010, vol. 21, no. 16, 1617-1625.
18. E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, O.V. Kvasha, and R. Lammering, Selective Lamb mode excitation by piezoelectric coaxial ring actuators // *Smart Mater. Struct.* 2010. V. 19. No. 3.

19. Ye.V. Glushkov, N.V. Glushkova, A.S. Krivonos, The excitation and propagation of elastic waves in multilayered anisotropic composites // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2010. V. 74. P. 297-305.

**Премии и награды, почетные звания**

№ п/п	Название премии/награды	Кем выдана	Год получения	Достижение, за которое вручена премия/награда
1	Государственная премия по науке и технике Российской Федерации за 2001 год	Президент Российской Федерации	2002	за цикл работ «Динамические контактные задачи механики сплошных сред»
2	Государственная научная стипендия для выдающихся ученых	Российская Академия Наук	2000	за разработку новых эффективных методов решения краевых задач динамической теории упругости, волновых процессов, прочности и разрушения, нашедших приложение в геофизике, сейсморазведке, дефектоскопии, акустоэлектронике и машиностроении
3	Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации	Министерство образования и науки Российской Федерации	2005	за ряд новых результатов, носящих фундаментальный характер, таких как обнаружение и исследование резонансных явлений в неоднородных средах и исследование сингулярности решения пространственных упругих тел, а также за большое внимание к преподавательской работе и работе с молодыми сотрудниками

4	Меркатор Профессор (DFG Mercator Professure)	Немецкое научное общество (Deutsche Forschungsgemeinschaft)	2007	за научно-педагогическую работу в Институте научных вычислений и математического моделирования Университета Карлсруэ (Institut für Wissenschaftliches Rechnen und Mathematische Modellbildung, IWRMM, Universitaet Karlsruhe) в области развития метода граничных интегральных уравнений в приложении к исследованию волновой динамики пьезо-смарт структур, исследования спектральных свойств интегральных операторов и связанных с ними эффектов резонансного прохождения или захвата и локализации волновой энергии, за разработку и чтение цикла лекций по приложению метода интегральных преобразований к задачам волновой динамики, решению динамических смешанных задач и особенностям компьютерной реализации интегрального подхода, за руководство и консультацию аспирантов и дипломников IWRMM.
5	Заслуженный деятель науки Кубани	Администрация Краснодарского края	2001	за активную научную работу и подготовку специалистов высшей квалификации в области прикладной математики
6	Золотая медаль XVIII Международного Салона изобретений и инновационных технологий «Архимед-2015»	Международное жюри	2015	за программное обеспечение для решения задач неразрушающего контроля слоистых композитов с помощью упругих волн

### Результаты интеллектуальной деятельности за последние 5 лет

#### Перечень наиболее значимых публикаций (не более 10)

№ п/п	Название издания	Авторы (в порядке, указанном в публикации)	Название публикации	Год, том, выпуск	Импакт-фактор издания (по Web of Science)	Реферируется	Индексируется
1	Journal of Sound and Vibration	Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Lammering R.	Trapped mode effects in notched plate-like structures	2015, 358, 0	1.81	Нет	Web of Science Scopus
2	Journal of Sound and Vibration	Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Giurgiutiu V.	Low-cost simulation of guided wave propagation in notched plate-like structures	2015, 352, 0	1.81	Нет	Web of Science Scopus

3	Journal of the Acoustical Society of America	Glushkov E., Glushkova N., Fomenko S.	Wave energy transfer in elastic half-spaces with soft interlayers	2015, 137, 4	1.50	Her	Web of Science Scopus
4	Journal of the Acoustical Society of America	Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Lammering R.	Group velocity of cylindrical guided waves in anisotropic laminate composites	2014, 135, 1	1.50	Her	Web of Science Scopus
5	Smart Materials and Structures	Glushkov E., Glushkova N., Golub M.V., Moll J., Fritzen C.-P.	Wave energy trapping and localization in a plate with a delamination	2012, 21, 12	2.50	Her	Web of Science Scopus
6	Composite Structures	A.A. Eremin, E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, R. Lammering	Evaluation of effective elastic properties of layered composite fiber-reinforced plastic plates by piezoelectrically induced guided waves and laser Doppler vibrometry	2015, 125, 0	3.32	Her	Web of Science Scopus
7	Journal of Applied Physics	Glushkov E., Glushkova N., Zhang C.	Surface and pseudo-surface acoustic waves piezoelectrically excited in diamond-based structures	2012, 112, 6	2.10	Her	Web of Science Scopus
8	Journal of the Acoustical Society of America	Glushkov E., Glushkova N., Eremin A.	Forced wave propagation and energy distribution in anisotropic laminate composites	2011, 129, 5	1.50	Her	Web of Science Scopus
9	Smart Materials and Structures	Glushkov E., Glushkova N., Lammering R., Eremin A., Neumann M.N.	Lamb wave excitation and propagation in elastic plates with surface obstacles: Proper choice of central frequencies	2011, 20, 1	2.50	Her	Web of Science Scopus

10	Journal of Intelligent Material Systems and Structures	E. Glushkov, N. Glushkova, O. Kvasha, D. Kern, and W. Seemann	Guided wave generation and sensing in an elastic beam using MFC piezoelectric elements: theory and experiment	2011, 21, 16	1.52	Нет	Web of Science Scopus
----	--	---	---	--------------	------	-----	-----------------------

**Список монографий и глав в монографиях**

№ п/п	Наименование монографии	Авторы	Год издания	ISBN, издательство	Количество страниц
1	Ultrasonic Guided Wave Characterization and Inspection of Laminate Fiber-Reinforced Composite Plates. Chapter 31 in "Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications"	E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, A.A. Eremin, A.A. Evdokimov and R. Lammering	2016	0930-8989, Springer International Publishing Switzerland	9

**Перечень объектов интеллектуальной собственности (патенты, авторские свидетельства и т.д.), автором которых является руководитель проекта**

№ п/п	Наименование объекта интеллектуальной собственности	Вид объекта	Дата регистрации в государственном реестре	Территория (страна) и срок действия	Охранный документ (патент, свидетельство о регистрации)	
					№	дата выдачи
1	Программный комплекс для расчета волновых полей в многослойных упругих пакетах «WaveField»	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	27.10.2010	РОССИЯ	2010617164	27.10.2010
2	Программный комплекс для моделирования гармонических колебаний в упругом слое с полосовой горизонтальной трещиной «Single Horizontal SL Crack 2D Layer»	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	31.03.2011	РОССИЯ	2011612658	31.03.2011
3	Программный комплекс для решения динамической задачи для системы поверхностная нагрузка – волновод с макронеоднородностью «SurfL-LWwO»	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	20.02.2012	РОССИЯ	2012611891	20.02.2012

4	Программный комплекс для моделирования гармонических колебаний в упругом слое с полосовой наклонной трещиной «Single Inclined SL Crack 2D Layer»	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	22.06.2011	РОССИЯ	2011614885	22.06.2011
5	Программный комплекс для расчета характеристик поверхностных и псевдоповерхностных акустических волн в волноводной структуре с пьезопокрытием "SAW-PSAW"	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	10.04.2013	РОССИЯ	2013613561	10.04.2013
6	Программный комплекс для расчета полос пропускания и запираания в одномерном волноводе с набором точечных неоднородностей "String-pass-gap"	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	10.04.2013	РОССИЯ	2013613563	10.04.2013
7	Программный комплекс для расчета характеристик поверхностных волн в упругом функционально-градиентном полупространстве "Waves-FGM"	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	02.12.2013	РОССИЯ	2013661248	02.12.2013
8	Программный комплекс для расчета динамических характеристик бегущих волн, возбуждаемых в слоистых композитных материалах поверхностными пьезоактивными элементами "Aniso_P WAS_pin-f'orce"	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	10.01.2014	РОССИЯ	2013618466	10.01.2014

9	Программный комплекс для идентификации эффективных упругих модулей слоистого трансверсально-изотропного материала по измеренным вдоль осей его симметрии значениям дисперсионных характеристик бегущих нормальных волн "T_I_P_inverse"	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	10.09.2014	РОССИЯ	2014619180	10.09.2014
10	Программный комплекс для идентификации эффективных упругих модулей волн оконно-армированного полимерного композиционного материала по измеренным вдоль произвольных направлений наблюдения значениям дисперсионных характеристик бегущих нормальных волн "CFRP_Arb_D_inverse"	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	12.01.2015	РОССИЯ	2015610316	12.01.2015
11	Комплекс программных модулей для решения дисперсионных уравнений, полуавтоматической трассировки и визуализации частотных зависимостей вещественных и комплексных волновых чисел "SmartRecRoot"	Свидетельство о регистрации программы ЭВМ и базы данных	16.04.2015	РОССИЯ	2015614357	16.04.2015

**Конференции, на которых были представлены доклады**

№ п/п	Название конференции	Уровень конференции (Международная, всероссийская, региональная)	Место и дата проведения	Язык доклада	Авторы и название доклада

1	3rd Polish Congress of Mechanics & 21st Computer Methods in Mechanics	Международная	Gdańsk, Poland 08.09.2015 – 11.09.2015	Английский	E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin and R. Lammering Investigation of resonance diffraction by hidden obstacles using laminate element method
2	International Congress on Ultrasonics	Международная	Metz, France 11.05.2015 – 15.05.2015	Английский	E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin and R. Lammering Guided wave propagation and diffraction in plates with obstacles: resonance transmission and trapping mode effects
3	11th World Congress on Computational Mechanics, WCCM 2014	Международная	Barcelona, Spain 20.07.2014 – 25.07.2014	Английский	Glushkov E.V., Glushkova N.V., Eremin A.A. Laminate element method for elastic guided wave diffraction simulation
4	7th European Workshop - Structural Health Monitoring 2014, EWSHM	Международная	Nantes, France 08.07.2014 – 11.07.2014	Английский	Glushkov E., Glushkova N., Eremin A., Giurgiutiu V. Analytically-based simulation for corrosion detection by guided waves
5	6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012)	Международная	Vienna, Austria 10.09.2012 – 14.09.2012	Английский	E. Glushkov, N. Glushkova, A. Eremin Ad hoc meshless technique for laminate composite structures
6	14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory	Международная	Kharkiv, Ukraine 28.08.2012 – 30.08.2012	Английский	E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, M.V. Golub and A.A. Eremin Spectral points and stop-pass effects in waveguides with obstacles
7	International Conference Days on Diffraction 2012 (DD 2012)	Международная	St. Petersburg, Russian Federation 28.05.2012 – 01.06.2012	Английский	Glushkov E.V., Glushkova N.V., Golub M.V., Moll J., Fritzen C.-P. Elastic wave energy trapping in a plate with a crack: Theory and experiment
8	IV European Conference on Computational Mechanics (ECCOMAS 2010)	Международная	Paris, France 16.05.2010 – 21.05.2010	Английский	E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, R. Lammering, A.A. Eremin, M.-N. Neumann Theoretical and experimental investigations of Lamb waves excitation and their diffraction by surface obstacles

9	Advances in Boundary Element Techniques XI	Международная	Berlin, Germany 12.07.2010 – 14.07.2010	Английский	E.V. Glushkov, N.V. Glushkova, A.A. Eremin Elastodynamic laminate element method for lengthy structures
10	IX международная научная конференция по гидроавиации «Гидроавиасалон-2012»	Международная	г. Геленджик 07.09.2012 – 08.09.2012	Русский	Глушков Е.В., Глушкова Н.В., Голуб М.В., Еремин А.А., Фоменко С.И. Волновой мониторинг скрытых дефектов и очагов коррозии

### Опыт по руководству научным коллективом за последние 5 лет

#### Проекты, выполненные или выполняемые в качестве руководителя

№ п/п	Название проекта	Размер финансирования (млн. руб.)	Источник финансирования	Срок выполнения проекта (начало-окончание)	Основные результаты проекта
1	Математическое и компьютерное моделирование волновых процессов в приложении к проблемам развития инфокоммуникационных технологий и волнового мониторинга композитных материалов	15.0	Государственное задание	18.07.2014 – 31.12.2016	Разработка и экспериментальная верификация эффективных (малозатратных и физически наглядных) полуаналитических методов решения волновых задач математической физики и создание на этой основе математических и компьютерных моделей, адекватно описывающих волновые процессы, явления и эффекты, используемые в новых поколениях устройств твердотельной электроники, в микро-электромеханических и инфо-диагностических системах мехатроники, в композитных пьезо-смарт-структурах и фононных кристаллах.

2	Piezo-optic-fiber technology for failure prevention of safety critical systems. Planning Grant 9846352013.	0.4	Международная программа (грант)	01.01.2013 – 31.12.2013	Грант для подготовки рабочего плана трехстороннего (США-Германия-Россия) международного проекта в рамках научно-исследовательской программы НАТО "Наука для мира и безопасности" (NATO Science for Peace and Security Programme). Область исследований – создание математических и компьютерных моделей и проведение экспериментальных исследований для создания систем активной диагностики состояния изделий и систем ответственного назначения с помощью бегущих упругих волн, генерируемых и регистрируемых распределенной сетью активных пьезосенсоров. Разработанная рабочая программа была представлена и успешно защищена на заседании отборочной комиссии (NATO's Independent Scientific Evaluation Group) в Брюсселе в феврале 2014 года. Было одобрено финансирование на 2014-2016 общим объемом 388 000 Евро (180 000 Евро для ИММИ КубГУ), однако из-за событий на Украине проект был приостановлен, а финансирование заморожено.
---	--	-----	---------------------------------	-------------------------------	--

3	<p>Возбуждение пьезоактивными элементами упругих волн в изотропных и анизотропных композитных волноводах и их дифракция на локальных неоднородностях</p>	2.0	<p>Российский фонд фундаментальных исследований</p>	<p>01.01.2013 – 31.12.2015</p>	<p>Проект относится к направлению «Создание новых математических методов для моделирования сложных процессов, протекающих в макро-, микро- и наноразмерных масштабах» региональной программы РФФИ-юг. В ходе его выполнения разработаны математические и компьютерные модели для электромеханических систем с пьезонакладками и проведен анализ характерных особенностей возбуждения ими упругих волн с учетом структурных характеристик материала, таких как слоистость и анизотропия упругих свойств современных композиционных материалов, а также формы и расположения пьезоактивных элементов. Наряду с теоретическими исследованиями проведена экспериментальная проверка разрабатываемых моделей с помощью современного измерительного оборудования ведущих в данной тематике научно-инженерных центров Германии и США.</p>
---	--	-----	---	--	--

4	Идентификация дефектов слоистых структур при волновом мониторинге	1.6	Российский фонд фундаментальных исследований	01.01.2011 – 31.12.2012	<p>В рамках интегрального подхода развит метод слоистых элементов для решения задач дифракции упругих волн на неоднородностях различных типов в слоистых материалах как в случае плоской деформации, так и в трехмерной постановке. Проанализированы специфические особенности прохождения и отражения бегущих волн через зоны, содержащие неоднородности. Проведена систематизация имеющихся и получены новые фундаментальные знания о характерных особенностях дифракции упругих волн на дефектах различной природы, необходимые для регуляризации некорректных обратных задач идентификации повреждений по регистрируемым отраженным сигналам. Показано, что частоты резонансного отклика дефектов и форма пространственной диаграммы рассеяния (т.е. распределение точек дискретного спектра и пространственная форма соответствующих собственных решений) являются важными отличительными признаками для распознавания и идентификации внутренних повреждений.</p>
---	---	-----	--	-------------------------------	---

5	Моделирование и анализ распространения упругих волн, возбуждаемых пьезоактивными элементами в анизотропных волноводах с неоднородностями	0.6	Российский фонд фундаментальных исследований	01.01.2011 – 31.12.2012	Рассмотрены трехмерные динамические краевые задачи о распространении упругих волн, возбуждаемых в многослойных анизотропных средах гибкими поверхностными пьезоактивными элементами. Разработаны и реализованы в виде пакета программ эффективные методы их численного решения, для которых проведено тестирование, сопоставление с имеющимися результатами других авторов и экспериментальная верификация.
---	--	-----	--	-------------------------------	---

6	Волновые явления и эффективные динамические свойства слоистых и матричных упругих композитов с разнородными дефектами	0.7	Российский фонд фундаментальных исследований	01.01.2011 – 31.12.2012	В ходе выполнения проекта созданы математические и компьютерные модели, позволяющие получать количественные оценки динамических характеристик композитов с дефектами типа трещин, полостей, поверхностных неоднородностей и неидеального контакта между компонентами структуры. При их создании использован численно-аналитический интегральный подход, в основе которого лежит метод граничных интегральных уравнений и метод граничных элементов. Для композитов с неидеальным контактом слоев разработана и верифицирована модель с пружинными граничными условиями, описывающими поврежденные интерфейсы как с полосовыми, так и с трехмерными плоскими микротрещинами. Полученные гранично-интегральные формулировки и решения задач, как и созданные на их основе компьютерные модели, предназначены для анализа прочности элементов конструкций из композитных материалов и для разработки методов их неразрушающего контроля средствами ультразвукового зондирования и акустической эмиссии.
---	---	-----	--	-------------------------------	--

7	Разработка методов волнового мониторинга слоистых композитных материалов с микроструктурой и определения их эффективных динамических свойств	5.7	Ведомственная целевая программа	01.01.2009 – 31.12.2011	Разработаны и реализованы в виде компьютерных моделей методы трехмерного анализа волновых полей, возбуждаемых в композитной подложке заданной нагрузкой, и построены эффективные решения для ряда задач возбуждения и распространения поверхностных и псевдоповерхностных акустических волн (ПАВ и ППАВ) в пьезосмарт-структурах с высокоскоростными алмазными подложками. Исследовано влияние анизотропии, частоты колебаний и типа прикладываемой нагрузки на направление оттока волновой энергии из зоны вибровоздействия. Выявлен и объяснен эффект смены направления максимального потока волновой энергии, излучаемой поверхностным пьезоактивным элементом в многослойный анизотропный композит, при изменении центральной частоты возбуждения сигнала. Проанализирована возможность возбуждения высших ППАВ с высокой скоростью распространения и малым затуханием.
---	--	-----	---------------------------------	-------------------------------	---

### Опыт по подготовке научных и педагогических кадров

#### *Опыт преподавательской деятельности*

С 1983 г. научная работа в НИИ и проблемных лабораториях сочетается с преподавательской деятельностью на математическом факультете КубГУ (в настоящее время – факультет компьютерных технологий и прикладной математики – ФКТиПМ). Первоначально преподавательская работа велась на условиях совместительства, а с 1996 года по настоящее время – в штатной должности профессора кафедры численных методов, преобразованной в 2008 году в кафедру вычислительных технологий ФКТиПМ (в настоящее время 0.25 ставки профессора и 0.75 ставки г.н.с. в ИММИ).

Для подготовки специалистов, владеющих разрабатываемым аппаратом моделирования волновых процессов, на факультете ежегодно специализировались одна-две студенческие группы. Наряду с привлечением студентов и

аспирантов к НИР, как в форме выполнения курсовых и дипломных работ, так и непосредственно для работы по проектам ИММИ, был разработан, внедрен в учебную практику и регулярно модернизируется авторский комплекс дисциплин специализации для углубленного овладения техникой интегральных преобразований, асимптотическими методами, элементами теории функций комплексной переменной и специальных функций в приложении к решению рассматриваемых краевых задач, а также для обучения тонкостям компьютерной реализации разрабатываемых на этой основе алгоритмов и математических моделей. С 1996 г. к этой преподавательской деятельности добавилось чтение лекций и проведение практических занятий по базовым математическим курсам (Линейная алгебра и геометрия, Математический анализ, Численные методы).

Учебная работа в форме лекций, выступлений на семинарах, консультации аспирантов и дипломников велась и во время поездок к зарубежным партнерам. Наиболее богатый опыт педагогической деятельности за рубежом был получен во время годовой работы в группе профессора В. Зееманна (W. Seemann, ITM, University of Karlsruhe, Germany) в качестве приглашенного профессора по программе Mercator Visiting Professorship. Для студентов и аспирантов машиностроительного факультета были разработаны, включены в учебную программу 2007-2008 учебного года и прочитаны лекционные курсы "Integral transforms in wave problems for layered structures", "Integral equations in mixed problems of Elastodynamics" и "Specific matters of the integral approach computer implementation".

#### **Опыт по подготовке докторов наук и кандидатов наук**

№ п/п	Название диссертации	Ученая степень	Дата защиты	Специальность ВАК	ФИО диссертанта
1	Возбуждение и распространение упругих волн в многослойных анизотропных композитах	кандидат	30.11.2010	01.02.04	Кривонос Александр Сергеевич
2	Рассеяние упругих волн на интерфейсной трещине произвольной в плане формы	кандидат	26.04.2001	01.02.04	Ехлаков Александр Васильевич
3	Энергия электроупругих волн, возбуждаемых поверхностным гармоническим источником в пьезоэлектрической полуограниченной среде	кандидат	11.10.1996	01.02.04	Сыромятников Павел Викторович
4	Распространение упругих волн в составных волноводах	кандидат	18.04.1996	01.02.04	Никитин Юрий Геннадиевич
5	Формирование направленного излучения в стратифицированной упругой среде системой поверхностных виброисточников	кандидат	03.07.1995	01.02.04	Фурманюк Олег Саввич
6	Интерфейсные волны в средах со сварным швом	кандидат	02.06.1994	01.02.04	Аль-Акур Амин Ахмед
7	Гармонические колебания деформируемых и недеформируемых поверхностных объектов на упругом слое	кандидат	19.06.1992	01.02.04	Кириллова Евгения Вадимовна

8	Мощность, отдаваемая внутренним гармоническим источником в упругое полупространство	кандидат	19.06.1992	01.02.04	Бужан Виталий Викторович
9	Анализ особенности напряжений в окрестности угловых точек упругих многогранников	кандидат	29.05.1992	01.02.04	Лапина Ольга Николаевна
10	Вибрация системы штампов на многослойном упругом основании	кандидат	16.10.1987	01.02.04	Зинченко Виталий Жаннович

#### Общественная научная деятельность

*Членство в редколлегиях и консультативных советах рецензируемых научных изданий (с указанием сроков членства)*

Член редколлегии журнала "Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества" (<http://vestnik.kubsu.ru/>), ISSN 1729-5459, с момента его основания в 2003 г. по 2015 г. (входит в перечень ВАК). Рецензент-консультант следующих журналов индексируемых в Web-of-Science и Scopus: Smart Materials and Structures (2007-2013), The Journal of the Acoustical Society of America (2011-2015), Central European Journal of Mathematics (2012-2013), Mathematical Problems in Engineering (2013), Structural Health Monitoring (2013), Прикладная математика и механика (2004-2012), Journal of Sound and Vibration (2011-2015), Waves in Random and Complex Media (2011-2012), Journal of Intelligent Material Systems and Structures (2012), International Journal of Solids and Structures (2000-2011), Wave Motion (2011, 2015), Sensors (2009), Applied Acoustics (2009) Акустический журнал (2014), ZAMM (2014).

#### *Членство в программных и организационных комитетах международных конференций*

Участие в программных и организационных комитетах Международных конференций "Современные проблемы механики и математики", 21-25 мая 2013 г., Львов, Украина и "Современные проблемы механики деформируемого твердого тела, дифференциальных и интегральных уравнений", 23-26 августа 2013 г., Одесса.

#### *Членство в руководящих и консультативных органах международных научных обществ и объединений*

Acoustical Society of America, Membership # 11822103 (Акустическое общество Америки, США)

*С условиями Конкурса и действующей редакцией «Положения о конкурсном отборе научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации» ознакомлен и согласен. Подтверждаю свое участие в конкурсе.*

*Согласен на использование моих персональных данных для проведения экспертизы заявки и подготовки аналитических материалов по конкурсному отбору научных (научно-технических) проектов коллективов исследователей. Данное согласие может быть отозвано мною в письменной форме.*

Участник конкурсного отбора

 /Е.В. Глушков

**ФОРМА 3. ИНФОРМАЦИОННАЯ КАРТА ПРОЕКТА**

(регистрационный номер заявки 9.1022.2017/ПЧ )

**1. НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА:**

Апробация разрабатываемых математических и экспериментальных основ пьезо-оптоволоконных технологий обнаружения и идентификации скрытых дефектов и признаков деградации материала с помощью бегущих упругих волн

**2. ГРУППА ПРОЕКТА:**

Апробации идей

**3. ЗАПРАШИВАЕМАЯ СУММА:**

всего 26 850,0 тыс. рублей, в том числе на 2017 год - 8 950,0 тыс. рублей, на 2018 год - 8 950,0 тыс. рублей, на 2019 год - 8 950,0 тыс. рублей.

**4. АННОТАЦИЯ:**

Целью проекта является развитие и практическая апробация методов раннего обнаружения скрытых дефектов и признаков деградации материала тонкостенных конструкций с помощью ультразвуковых бегущих волн (волн Лэмба), возбуждаемых и регистрируемых системой встроенных пьезоактуаторов и/или оптоволоконных сенсоров. Преимущество данной технологии (Structural Health Monitoring – SHM) по сравнению с традиционными методами ультразвуковой дефектоскопии и акустической эмиссии состоит в возможности вести постоянный активный контроль протяженных конструкций с помощью сравнительно редкой сети пьезоактуаторов и сенсоров, не перемещая их вдоль инспектируемой поверхности. Более того, использование бегущих волн, распространяющихся на большие расстояния и взаимодействующих с неоднородностями (дефектами) любого типа, выявляя тем самым их наличие, позволяет контролировать скрытые участки конструкции, недоступные для традиционных средств ультразвукового контроля. Характеристики бегущих волн чувствительны к изменению упругих параметров материала, поэтому они являются также удобным инструментом контроля изменений прочностных свойств в процессе эксплуатации. Данные технологии разрабатываются для контроля состояния объектов и конструкций, выход из строя или внезапное разрушение которых может привести к серьезным экономическим потерям или даже к катастрофическим последствиям. Примером таких объектов являются аэрокосмические изделия, трубопроводы и промышленные установки, емкости для химических материалов, объекты атомной промышленности и т.п.

Проектирование и настройка SHM систем, а также расшифровка получаемых данных предполагают наличие математических и компьютерных моделей, адекватно описывающих волновые процессы в инспектируемых структурах. Здесь еще остается много важных для SHM проблем, требующих углубленного исследования и разработки эффективных методов их решения. Таких, например, как связные электромеханические контактные задачи, возникающие при моделировании работы пьезоактуаторов, пространственная дифракция бегущих волн на препятствиях произвольной формы, формирование ловушечных мод с резонансным захватом и локализацией волновой энергии в окрестности дефекта и обратные задачи восстановления характеристик дефекта. При описании волновых процессов в композитных материалах, которые находят все более широкое применение в конструкциях ответственного назначения, моделирование еще более затруднено из-за усложненных физико-механических свойств таких материалов.

В ходе выполнения предыдущих проектов коллективом накоплен хороший задел по решению возникающих здесь математических задач и созданию на этой основе эффективных компьютерных моделей. В рамках международного научного сотрудничества проводится их экспериментальная проверка на дорогостоящем оборудовании немецких коллег (лазерные виброметры, системы регистрации и обработки сигналов, образцы композитных материалов со встроенными пьезоактуаторами и сенсорами и др.). Экспериментальные измерения не только подтвердили адекватность и высокую

эффективность разрабатываемых моделей, а также наличие предсказанных волновых эффектов, но и позволили изучить современные технологии бесконтактных измерений и обработки экспериментальных данных. Опираясь на накопленный задел, в рамках предлагаемого проекта планируется наряду с продолжением разработки теоретических основ SHM, публикациями в высокорейтинговых научных изданиях и получением свидетельств на разработанные программные продукты, сделать упор на практическую апробацию разрабатываемых технологий. Предполагается изготовить экспериментальные образцы, стенды, макеты и аппаратно-программные комплексы, демонстрирующие возможность оценки физико-механических параметров материала инспектируемой конструкции и контроля за их изменением в процессе эксплуатации, обнаружения скрытых дефектов и оценки их типа, размеров и потенциальной опасности на основе данных активного мониторинга бегущими волнами.

#### **5. КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА И СЛОВСОЧЕТАНИЯ:**

волновой мониторинг, пьезоактивные и волоконно-оптические сенсоры, композитные материалы, компьютерное моделирование, обнаружение скрытых дефектов, волновой контроль свойств материала, обратные задачи

#### **6. ОБЛАСТЬ ЗНАНИЯ:**

Механика и машиностроение

#### **7. КОД ТЕМЫ ПО РУБРИКАТОРУ ГРНТИ:**

27.35, 27.35.41, 27.35.35, 27.41, 29.37.03, 29.37.15, 29.37.25, 30.19, 30.19.21, 47.55, 47.33.37, 50.53, 55.47.09

#### **8. ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ НАУКИ, ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИКИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ:**

Транспортные и космические системы

#### **9. ПРИОРИТЕТНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ РОССИИ:**

Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения

#### **10. КРИТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ:**

Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

#### **11. НАПРАВЛЕНИЕ В РАМКАХ НАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНИЦИАТИВЫ ИЛИ ВЫТЕКАЮЩЕЕ ИЗ ПОРУЧЕНИЙ ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ИЛИ ПОРУЧЕНИЙ ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ:**

группа «Рынки»

Нет

**группа «Технологии»**

Сенсорика

**направление**

Информационные и коммуникационные системы нового поколения

Участник конкурсного отбора

  
/Е.В. Глушков

**ФОРМА 4. ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТА**

(регистрационный номер заявки 9.1022.2017/ПЧ )

**1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ:**

Проект направлен на развитие технологий волнового мониторинга, основанных на использовании бегущих упругих волн, для контроля состояния объектов и конструкций, выход из строя или внезапное разрушение которых может привести к серьезным экономическим потерям или даже к катастрофическим последствиям. Примером таких объектов являются трубопроводы и промышленные установки, емкости для химических материалов, аэрокосмические изделия, объекты атомной промышленности и т.п. Распространяясь на большие расстояния вдоль протяженных элементов конструкции, бегущие волны взаимодействуют с неоднородностями (дефектами) любой природы, выявляя их наличие и местоположение, а после обработки отраженных сигналов – и их основные характеристики, позволяющие судить о степени потенциальной угрозы разрушения. Данные технологии, объединенные общим названием Structural Health Monitoring (SHM), интенсивно развиваются за рубежом, но все еще малоизвестны в нашей стране. Они базируются на возбуждении и регистрации бегущих волн сравнительно редкой сетью встроенных пьезоактуаторов и/или оптоволоконных сенсоров и обработке полученной информации с помощью математических и компьютерных моделей, адекватно описывающих волновые процессы в контролируемых элементах конструкции. Создание таких моделей требует разработки эффективных методов решения трех фундаментальных проблем волновой динамики с учетом специфических условий работы SHM систем:

1. Возбуждение бегущих волн при взаимодействии источника (пьезоактуатора) с упругим волноводом.
2. Распространение возбуждаемых бегущих волн в слоистых структурах с усложненными свойствами.
3. Дифракция упругих волн на локализованных препятствиях (повреждениях и дефектах).

К данным прямым задачам естественным образом добавляется четвертая группа обратных задач:

4. Определение упругих свойств и идентификация дефектов по характеристикам регистрируемых волн.

Несмотря на успехи, достигнутые за последние десятилетия в данной области, здесь еще остается много нерешенных или малоисследованных проблем, особенно при использовании SHM технологий для контроля конструкций из композитных материалов, отличающихся многослойностью и анизотропией упругих свойств. Примерами таких конструкций могут служить корпуса аэрокосмических изделий из армированного углепластика (Boeng 787 Dreamliner и Airbus A350 XWB, перспективный российский пассажирский самолет МС-21, командный отсек российского пилотируемого космического корабля нового поколения, представленный недавно на авиасалоне МАКС-2015, и др.). Композиты также широко используются и при изготовлении таких, требующих особых мер безопасности объектов, как трубопроводы, цистерны и емкости для топлива и химреактивов и т.п.

Следует отметить, что SHM системы не рассматриваются в качестве замены традиционным методикам неразрушающего контроля. Внедрение SHM технологий позволяет перейти от планового периодического контроля к мониторингу текущего состояния на основе обработки информации, постоянно поступающей от сети пьезоактивных сенсоров.

**2. ЦЕЛЬ ПРОЕКТА:**

Общей целью является практическая апробация разработанных ранее и разрабатываемых в рамках предлагаемого проекта теоретических и технологических основ неразрушающего мониторинга тонкостенных конструкций из металлов и волоконно-армированных полимерных композиционных материалов с помощью бегущих упругих волн.

**3. ЦЕЛЕВАЯ ГРУППА ПРОЕКТА:**

Аэрокосмическая промышленность, судостроение, химическая промышленность, атомная промышленность, гражданское строительство, трубопроводный транспорт.

#### 4. ОПИСАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:

1. Математическое и компьютерное моделирование процессов возбуждения, распространения и дифракции упругих волн. Совершенствование известных методов и подходов и разработка новых. Их обобщение на новые классы задач (неполное сцепление слоев, анизотропия, микроструктура, связанные поля, усложненная геометрия и т.п.) и реализация в виде новых компьютерных моделей. Развитие гибридного подхода (локально-глобальное численно-аналитическое решение).
2. Создание измерительных стендов, макетов и демонстрационных образцов для экспериментальной верификации разрабатываемых математических и компьютерных моделей и теоретически предсказанных волновых эффектов. Получение данных измерений, необходимых для отработки алгоритмов решения обратных задач восстановления упругих свойств композитного материала и параметров дефекта по рассеянному волновому полю.
3. Создание программных продуктов с дружественным интерфейсом. Проведение параметрического анализа с целью выявления волновых эффектов - характерных признаков определенного класса повреждений или дефектов. Исследование характерных особенностей распределения резонансных полюсов рассеяния в комплексной плоскости частоты и их проявления в нестационарных сигналах, регистрируемых сенсорами.
4. Интеграция разработанных программных продуктов и экспериментальных стендов в прототипы единых программно-аппаратных комплексов для осуществления непрерывного мониторинга состояния конструкций с помощью бегущих упругих волн; проверка разработанных алгоритмов и расчетных параметров на данных прототипах, а также на других SHM системах в рамках международной коллаборации.

#### 5. ОПИСАНИЕ НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ:

Математическое моделирование проводится на основе интегрального подхода, который занимает промежуточное положение между лучевой теорией и прямыми численными методами решения волновых задач, сочетая их достоинства. В рамках данного подхода возбуждаемые и рассеиваемые волновые поля представляются через поверхностные интегралы, содержащие фундаментальные решения (матрицы Грина) для рассматриваемых волноводных структур. Асимптотические представления, получаемые из точных интегральных, несут в себе информацию о характеристиках волнового поля, присущих рассматриваемому образцу, и о параметрах источника. Для решения контактных задач взаимодействия пьезоактуаторов со структурой или задач дифракции бегущих волн на препятствиях (дефектах) интегральные представления сводятся к граничным интегральным уравнениям. Для препятствий сложной геометрии разрабатываются гибридные схемы, основанные на сопряжении явных интегральных или асимптотических представлений во внешней области протяженной волноводной структуры с конечно-элементным решением в ограниченной области, содержащей неоднородность.

Для возбуждения и регистрации упругих волн в макетах SHM систем используются пьезопреобразователи в виде пленочных накладок (Piezoelectric Wafer Active Sensors – PWAS). В рамках международной кооперации для измерения и визуализации волновых полей на этапе верификации разрабатываемых компьютерных моделей применяется лазерная виброметрия, основанная на использовании эффекта Доплера (Laser Doppler Vibrometry – LDV). Лазерные виброметры позволяют получать наглядные скан-образы поверхности исследуемого образца с высоким разрешением. Непосредственно в ИММИ КубГУ для этой цели используются также бесконтактные акустические актуаторы (Air-Coupled Transducers – АСТ), являющиеся более дешевой альтернативой LDV. Наряду с ними для регистрации сигналов в настоящее время все шире используются встроенные оптоволоконные сенсоры, обладающие более высокой чувствительностью (Fiber Bragg Gratings – FBG). Для генерации и обработки сигналов используется стандартное оборудование, включающее устройства на микропроцессорах и усилители.

#### 6. РЕЗУЛЬТАТЫ:

В результате выполнения проекта планируется:

- 1) разработать методы и алгоритмы построения полуаналитических решений для ряда задач волновой динамики, эффективное решение которых ускорит дальнейшее развитие SHM технологий, особенно в области контроля изделий из композитных материалов;
- 2) реализовать их в виде компьютерных моделей и провести экспериментальную проверку;
- 3) создать на этой основе демонстрационные стенды, макеты и прототипы реальных SHM систем (программно-аппаратные комплексы).

Детализация результатов дается в Форме 5. «План реализации проекта» (Ожидаемые результаты по годам).

Ожидается, что использование разработанных в ходе выполнения проекта математических и компьютерных моделей приведет к созданию научно-технического продукта с характеристиками, не уступающими, а в некоторых аспектах и опережающими существующие мировые аналоги.

Для целевых групп использование SHM технологий

- 1) снижает риск отказов или внезапных катастрофических разрушений дорогостоящих и жизненно-важных объектов;
- 2) снижает издержки на плановую профилактику и контроль текущего состояния элементов конструкции за счет автоматизации и возможности непрерывного активного мониторинга;
- 3) исключает человеческий фактор и дает возможность дистанционно контролировать участки, недоступные для зондирования с помощью традиционных переносных ультразвуковых дефектоскопов.

## 7. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРЕДПОЛАГАЕМОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТА:

Результаты проекта предназначены для

- 1) оптимизации SHM систем и совершенствования методов их работы, а также методик обработки регистрируемых данных;
- 2) выявления новых волновых эффектов, которые могут служить основой для создания систем, работающих на новых принципах;
- 3) повышение на этой основе разрешающей способности и достоверности выявления дефектов и признаков деградации материала на ранних стадиях их зарождения.

Значительная часть результатов, относящихся к разрабатываемым методам решения волновых задач и выявленным волновым эффектам, носит фундаментальный характер и поэтому представляет интерес не только для SHM, но и для существенно более широкого круга приложений в таких областях как, например, акустоэлектроника (создание устройств на поверхностных акустических волнах) или мехатроника (пьезо-смарт структуры и микроэлектронные электромеханические системы).

## 8. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЕКТА:

В соответствии с логикой научно-технического развития, новые методы распознавания дефектов и схемы формирования SHM систем, обеспечивающие повышение разрешающей способности и достоверности выявления дефектов и признаков деградации материала, должны со временем замещать существующие. Этим обеспечивается один из долгосрочных эффектов проекта после завершения финансирования. Долгосрочный эффект на развитие науки оказывают также полученные новые фундаментальные результаты. И наконец, созданные экспериментальные установки, разработанные математические методы и компьютерные программы, а также подготовленные научно-технические кадры, владеющие этой техникой, также являются результатом выполнения проекта, имеющим долгосрочный эффект.

## 9. НАУЧНЫЙ ЗАДЕЛ ПО ПРОЕКТУ:

№ п/п	Тема НИР	Период выполнения НИР	Стоимость НИР, (млн. руб.)	Источник финансирования (грантодатель)	Аннотация научных результатов НИР
1	Математическое и компьютерное моделирование волновых процессов в приложении к проблемам развития инфокоммуникационных технологий и волнового мониторинга композитных материалов	18.07.2014 - 31.12.2016	15,0	Государственное задание	Разработка и экспериментальная верификация эффективных (малозатратных и физически наглядных) полуаналитических методов решения волновых задач математической физики и создание на этой основе математических и компьютерных моделей, адекватно описывающих волновые процессы, явления и эффекты, используемые в новых поколениях устройств твердотельной электроники, в микро-электромеханических и инфо-диагностических системах мехатроники, в композитных пьезо-смарт-структурах и фононных кристаллах.
2	Piezo-optic-fiber technology for failure prevention of safety critical systems. Planning Grant 9846352013.	01.01.2013 - 31.12.2013	0,4	Международная программа (грант)	Грант для подготовки рабочего плана трехстороннего (США-Германия-Россия) международного проекта в рамках научно-исследовательской программы НАТО "Наука для мира и безопасности" (NATO Science for Peace and Security Programme). Область исследований – создание математических и компьютерных моделей и проведение экспериментальных исследований для создания систем активной диагностики состояния изделий и систем ответственного назначения с помощью бегущих упругих волн, генерируемых и регистрируемых распределенной сетью активных пьезосенсоров. Разработанная рабочая программа была представлена и успешно защищена на заседании отборочной комиссии (NATO's Independent Scientific Evaluation Group) в Брюсселе в феврале 2014 года. Было

№ п/п	Тема НИР	Период выполнения НИР	Стоимость НИР, (млн. руб.)	Источник финансирования (грантодатель)	Аннотация научных результатов НИР
					одобрено финансирование на 2014-2016 общим объемом 388 000 Евро (180 000 Евро для ИММИ КубГУ), однако из-за событий на Украине проект был приостановлен, а финансирование заморожено.
3	Возбуждение пьезоактивными элементами упругих волн в изотропных и анизотропных композитных волноводах и их дифракция на локальных неоднородностях	01.01.2013 - 31.12.2015	2,0	Российский фонд фундаментальных исследований	Проект относится к направлению «Создание новых математических методов для моделирования сложных процессов, протекающих в макро-, микро- и наноразмерных масштабах» региональной программы РФФИ-юг. В ходе его выполнения разработаны математические и компьютерные модели для электромеханических систем с пьезонакладками и проведен анализ характерных особенностей возбуждения ими упругих волн с учетом структурных характеристик материала, таких как слоистость и анизотропия упругих свойств современных композиционных материалов, а также формы и расположения пьезоактивных элементов. Наряду с теоретическими исследованиями проведена экспериментальная проверка разрабатываемых моделей с помощью современного измерительного оборудования ведущих в данной тематике научно-инженерных центров Германии и США.
4	Идентификация дефектов слоистых структур при волновом мониторинге	01.01.2011 - 31.12.2012	1,6	Российский фонд фундаментальных исследований	В рамках интегрального подхода развит метод слоистых элементов для решения задач дифракции упругих волн на неоднородностях различных типов в слоистых материалах как в случае плоской деформации, так и в трехмерной постановке. Проанализированы специфические особенности прохождения и отражения бегущих волн через зоны,

№ п/п	Тема НИР	Период выполнения НИР	Стоимость НИР, (млн. руб.)	Источник финансирования (грантодатель)	Аннотация научных результатов НИР
					содержащие неоднородности. Проведена систематизация имеющихся и получены новые фундаментальные знания о характерных особенностях дифракции упругих волн на дефектах различной природы, необходимые для регуляризации некорректных обратных задач идентификации повреждений по регистрируемым отраженным сигналам. Показано, что частоты резонансного отклика дефектов и форма пространственной диаграммы рассеяния (т.е. распределение точек дискретного спектра и пространственная форма соответствующих собственных решений) являются важными отличительными признаками для распознавания и идентификации внутренних повреждений.
5	Моделирование и анализ распространения упругих волн, возбуждаемых пьезоактивными элементами в анизотропных волноводах с неоднородностями	01.01.2011 - 31.12.2012	0,6	Российский фонд фундаментальных исследований	Рассмотрены трехмерные динамические краевые задачи о распространении упругих волн, возбуждаемых в многослойных анизотропных средах гибкими поверхностными пьезоактивными элементами. Разработаны и реализованы в виде пакета программ эффективные методы их численного решения, для которых проведено тестирование, сопоставление с имеющимися результатами других авторов и экспериментальная верификация.
6	Волновые явления и эффективные динамические свойства слоистых и матричных упругих композитов с разнородными дефектами	01.01.2011 - 31.12.2012	0,7	Российский фонд фундаментальных исследований	В ходе выполнения проекта созданы математические и компьютерные модели, позволяющие получать количественные оценки динамических характеристик композитов с дефектами типа трещин, полостей, поверхностных неоднородностей и

№ п/п	Тема НИР	Период выполнения НИР	Стоимость НИР, (млн. руб.)	Источник финансирования (грантодатель)	Аннотация научных результатов НИР
					<p>неидеального контакта между компонентами структуры. При их создании использован численно-аналитический интегральный подход, в основе которого лежит метод граничных интегральных уравнений и метод граничных элементов. Для композитов с неидеальным контактом слоев разработана и верифицирована модель с пружинными граничными условиями, описывающими поврежденные интерфейсы как с полосовыми, так и с трехмерными плоскими микротрещинами. Полученные гранично-интегральные формулировки и решения задач, как и созданные на их основе компьютерные модели, предназначены для анализа прочности элементов конструкций из композитных материалов и для разработки методов их неразрушающего контроля средствами ультразвукового зондирования и акустической эмиссии.</p>
7	Разработка методов волнового мониторинга слоистых композитных материалов с микроструктурой и определения их эффективных динамических свойств	01.01.2009 - 31.12.2011	5,7	Ведомственная целевая программа	<p>Разработаны и реализованы в виде компьютерных моделей методы трехмерного анализа волновых полей, возбуждаемых в композитной подложке заданной нагрузкой, и построены эффективные решения для ряда задач возбуждения и распространения поверхностных и псевдоповерхностных акустических волн (ПАВ и ППАВ) в пьезосмарт-структурах с высокоскоростными алмазными подложками. Исследовано влияние анизотропии, частоты колебаний и типа прикладываемой нагрузки на направление оттока волновой энергии из зоны вибровоздействия. Выявлен и</p>

№ п/п	Тема НИР	Период выполнения НИР	Стоимость НИР, (млн. руб.)	Источник финансирования (грантодатель)	Аннотация научных результатов НИР
					объяснен эффект смены направления максимального потока волновой энергии, излучаемой поверхностным пьезоактивным элементом в многослойный анизотропный композит, при изменении центральной частоты возбуждения сигнала. Проанализирована возможность возбуждения высших ППАВ с высокой скоростью распространения и малым затуханием.
8	Моделирование динамического поведения композитных материалов с повреждениями, неоднородностям и зонами неидеального контакта: приложения в неразрушающем контроле	30.05.2010 - 30.11.2012	1,9	Федеральная целевая программа	Обобщение применимости интегрального подхода и разработанных моделей поврежденных композитов для описания волновых колебаний в слоистых материалах с полосовыми дефектами, а также оценка возможностей описания полосовых отслоений разной геометрии в зависимости от типа композита.
9	Теоретико-экспериментальное решение обратных задач по восстановлению упругих свойств слоистых композитов и идентификации в них неоднородностей с применением упругих волн Лэмба	01.01.2013 - 31.12.2014	3,8	Российский фонд фундаментальных исследований	Были созданы компьютерные модели для анализа волновых полей, возбуждаемых в слоистой композитной структуре поверхностными пьезоактивными элементами в рамках упрощенной модели точечных сил. Предложена неразрушающая методика определения упругих модулей трансверсально-изотропного композитного материала, основанная на использовании теоретических и измеренных дисперсионных кривых фундаментальных волн Лэмба. Проведен сравнительный экспериментальный анализ динамики пьезоактуаторов с разной степенью отслоения и установлены закономерности, заключающиеся в отклонении несущей частоты. С помощью интегрального подхода и вариационно-разностного метода развиты математические модели, описывающие дифракцию

№ п/п	Тема НИР	Период выполнения НИР	Стоимость НИР, (млн. руб.)	Источник финансирования (грантодатель)	Аннотация научных результатов НИР
					упругих волн Лэмба на трещинах произвольной формы. Построена асимптотика для круговой интерфейсной трещины, на основе которой получено аналитическое выражение для жёсткостей в граничных условиях, описывающих поврежденные интерфейсы в трёхмерном случае.
10	Волновая динамика слоистых фононных кристаллов: моделирование неповрежденных и поврежденных структур, фильтрационные и блокирующие свойства	06.08.2012 - 15.11.2013	1,4	Федеральная целевая программа	Разработан численно-устойчивый подход на основе метода матриц переноса решения задачи распространения гармонических плоских волн в слоистых периодических волноводах (фононных кристаллах), в том числе содержащих функционально-градиентные прослойки. Получены критерии существования запрещенных зон в фононном кристалле при плоских колебаниях. Исследованы свойства запрещенных зон различного типа в зависимости от частоты колебаний, типа падающей волны и угла ее распространения, в зависимости от концентраций однородных и градиентных составляющих. Созданы математические модели и компьютерные алгоритмы для анализа волновой динамики фононного кристалла с одиночной трещиной, а также с набором трещин и отслоений, основанные на решении граничных интегральных уравнений.
11	Волновой мониторинг состояния композитных материалов и тонкостенных конструкций с использованием активных пьезосенсоров	01.01.2014 - 31.12.2016	1,6	Российский фонд фундаментальных исследований	Разработаны упрощенные (инженерные) модели на основе теории балок и пластин для быстрого и малозатратного параметрического анализа взаимодействия бегущих упругих волн с дефектами различной геометрии в слоистых изотропных материалах и дана оценка

№ п/п	Тема НИР	Период выполнения НИР	Стоимость НИР, (млн. руб.)	Источник финансирования (грантодатель)	Аннотация научных результатов НИР
					диапазона их применимости. Разработан и реализован алгоритм восстановления эффективных упругих модулей слоистых армированных композитов по регистрируемым групповым скоростям бегущих волн, возбуждаемых активными пьезоэлементами. На основе интегрального подхода развиты компьютерные модели для расчета волновых полей, возбуждаемых пьезоактуатором в слоистых анизотропных пластинах, а также модели для исследования дифракции возбуждаемых бегущих волн на дефектах различного вида. Выявлен ряд новых, экспериментально подтвержденных, волновых эффектов и закономерностей, связанных с эффектом резонансного захвата и локализации энергии набегающей волны в окрестности дефектов различного вида в случае плоского деформированного состояния.

Участник конкурсного отбора

  
/Е.В. Глушков

**ФОРМА 5. ПЛАН РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА**

(регистрационный номер заявки 9.1022.2017/ПЧ )

Год	Содержание выполняемых работ	Ожидаемые результаты	Перечень документов, разрабатываемых на этапе
2017	<p>Общее название этапа «Взаимодействие источника со структурой, возбуждение и распространение бегущих волн». Детализация: 1. Создание и экспериментальная проверка компьютерных моделей с дружественным интерфейсом для расчета характеристик волновых полей, возбуждаемых и регистрируемых встроенными или наклеенными пьезоэлектрическими актуаторами (piezoelectric wafer active sensors – PWAS) или бесконтактными акустическими источниками (air-coupled transducers – АСТ) в образцах различного строения (металлические и композитные пластины, подложки с покрытиями, ламинаты и сэндвич структуры, погруженные волноводы и др.). 2. Проведение параметрического анализа в рамках созданных моделей с целью выявления оптимальных частотных диапазонов и формы сигнала управляющих посылок для максимизации излучения зондирующих бегущих волн в зависимости от соотношения размеров источника, толщины образца, его строения и упругих свойств материала. 3. Создание экспериментальных стендов для верификации разрабатываемых компьютерных моделей и определения границ их практической применимости, в том числе образцов-демонстраторов, показывающих теоретически предсказанные эффекты, такие как значения оптимальных частот возбуждения или частотно-зависимая направленность излучения в анизотропных композитах. 4. Теоретическое и экспериментальное исследование изменения характеристик работы частично отслоившихся актуаторов</p>	<p>1. Разработаны и реализованы новые методы решения связанных контактных задач в пространственной постановке, в том числе и для пьезонакладок с частичным отслоением. На этой основе проведен численный анализ частотной зависимости адмитанса, определяющего количество волновой энергии, отдаваемой источником в среду, для используемых на практике видов пьезоактуаторов и подложек. Выявлены частоты максимального и минимального излучения энергии в целом и для отдельных мод. Проанализирована структура генерируемых волновых полей и закономерности распределения энергии источника между возбуждаемыми бегущими волнами. 2. Создан измерительный стенд с круговыми и прямоугольными пьезоактуаторами различных размеров, полностью или частично приклеенными к дюралюминиевым пластинам и проведена экспериментальная проверка наличия предсказанных частот оптимального возбуждения. Кроме того, численно определены и экспериментально подтверждены изменения в частотном спектре адмитанса, связанные с частичным отслоением актуатора, в частности, ожидаемое появление резонансов, обусловленных свободными колебаниями отслоившейся части пьезонакладки. 3. Для образцов, погруженных в акустическую среду и возбуждаемых бесконтактным АСТ источником колебаний, разработаны математические и компьютерные модели для расчета волновых полей и проведен анализ их характеристик, направленный на оценку затухания вытекающих бегущих волн, связанного с оттоком волновой энергии в</p>	<p>Годовой отчет, статьи в научных журналах (в первую очередь, в индексируемых в WoS и Scopus), статьи в сборниках трудов международных конференций и главы в специализированных монографиях, свидетельства о регистрации компьютерных программ, курсовые и дипломные работы.</p>

Год	Содержание выполняемых работ	Ожидаемые результаты	Перечень документов, разрабатываемых на этапе
	<p>с целью разработки алгоритмов самодиагностики систем PWAS. 5. Энергетический анализ: анализ зависимости количества энергии, отдаваемой актуатором в подложку, от частоты при различных соотношениях геометрических размеров и упругих свойств пьезонакладки и подложки; определение частотных диапазонов максимального и минимального уровня излучения волн определенного типа (фундаментальные A<sub>0</sub>, S<sub>0</sub> и высшие моды); выработка рекомендаций по оптимальному размещению и частотным режимам работы сети активных пьезосенсоров для инспектируемых конструкций из различных материалов.</p>	<p>окружающую среду, и выявления параметров, при которых такое затухание минимально, вплоть до практического вырождения истекающих волн в чисто бегущие. Для экспериментальной проверки этих результатов создан автоматизированный измерительный стенд, реализующий перемещение и позиционирование АСТ над образцом с помощью программно-управляемого манипулятора. 4. Создан набор компьютерных моделей с дружественным интерфейсом для расчета волновых полей, возбуждаемых заданным контактным или бесконтактным источником как в изотропных, так и в анизотропных, многослойных волноводных структурах, в том числе и с ослабленным соединением слоев, моделируемым пружинными граничными условиями. Проведен сравнительный анализ частотных спектров динамической реакции пластины и возбуждаемых мод для связанных и упрощенных несвязных моделей источника и на этой основе определен диапазон применимости последних. Проанализирована зависимость волноводных характеристик от степени деградации соединения слоев.</p>	
2018	<p>Общее название этапа «Композитные материалы: контроль изменения свойств, обнаружение и локализация скрытых дефектов» Детализация: 1. Измерение групповой скорости волновых пакетов, распространяющихся в различных направлениях от источника для верификации полученных ранее явных аналитических представлений для бегущих квазицилиндрических волн в анизотропных композитных образцах. 2. Вытекающие бегущие волны (leaky waves): вывод асимптотических представлений для вытекающих волн в структурах с упрочняющими покрытиями или внутренними жесткими прослойками, а также в образцах,</p>	<p>1. Будет создан экспериментально-измерительный стенд для композитных образцов с системой активных PWAS элементов и аппаратурой для генерации посылок и обработки сигналов. Проведено систематическое измерение групповой скорости волновых пакетов, распространяющихся между различными PWAS источниками-сенсорами для верификации явных аналитических представлений, полученных для бегущих квазицилиндрических волн, генерируемых в анизотропных композитных образцах. 2. На основе анализа вклада сближающихся полюсов и стационарных точек в асимптотику генерируемых волновых полей</p>	<p>Годовой отчет, статьи в научных журналах (в первую очередь, в индексируемых в WoS и Scopus), статьи в сборниках трудов международных конференций, свидетельства о регистрации компьютерных программ, курсовые и дипломные работы, кандидатские диссертации.</p>

Год	Содержание выполняемых работ	Ожидаемые результаты	Перечень документов, разрабатываемых на этапе
	<p>погруженных в акустическую среду. Проведение измерений вытекающих волн на стенде с бесконтактным АСТ сенсором; сопоставление с расчетными характеристиками. 3. Разработка метода и компьютерная реализация алгоритма определения эффективных упругих модулей многослойных волоконно-армированных композитных материалов по характеристикам возбуждаемых упругих волн на основе минимизация невязки между измеренными и расчетными характеристиками фундаментальных и высших мод. Создание экспериментального стенда для проверки разрабатываемых подходов, проведение тестовых измерений и расчетов. 4. Метод обращения времени (МОВ) для локализации источника сигналов (актуатора или рассеивающего набегающие волны дефекта), зарегистрированных сетью сенсоров; реализация и экспериментальная проверка метода на изотропных (дюралевых) и анизотропных (композитных) образцах на базе полученных явных представлений для квазицилиндрических волн.</p>	<p>будут получены явные представления для вытекающих волн в различных волноводных структурах. Проведены систематические измерения их характеристик на стенде с бесконтактным АСТ сенсором и сопоставления с расчетными характеристиками. 3. Созданы программный комплекс и экспериментальный стенд, отработана методика определения эффективных упругих модулей пластин из композитных материалов по регистрируемым характеристикам бегущих упругих волн. Проведены тестовые измерения и расчеты, показывающие степень достоверности определения значений различных упругих констант. 4. Для определения местоположения скрытых дефектов по отраженным и рассеянным волнам, регистрируемым сравнительно редкой сетью сенсоров, будет реализован и экспериментально проверен на изотропных и анизотропных образцах метод обращения времени. Проведены тестовые измерения и расчеты и на этой основе сделаны оценки возможностей метода в зависимости от числа и расстановки элементов сети активных сенсоров и выработаны рекомендации по практической реализации МОВ.</p>	
2019	<p>Общее название этапа «Дифракция на локальных неоднородностях, идентификация дефектов». Детализация: 1. Дифракция на горизонтальных трещинах и отслоениях: создание и верификация компьютерных моделей для расчета характеристик рассеянного поля на базе решения одномерных (для полосовых трещин) или двумерных (пространственные трещины) интегральных уравнений по схеме Галеркина со специальным выбором базисных функций; наклонные и вертикальные трещины, в том числе и выходящие на поверхность. 2. Объемные</p>	<p>1. На основе полуаналитических и гибридных сеточно-аналитических методов решения задач дифракции для упругих волноводов будут разработаны и экспериментально верифицированы малозатратные компьютерные модели с дружественным интерфейсом для расчета характеристик рассеянного поля для ряда типичных видов дефектов, представляющих потенциальную опасность разрушения (трещины, расслоения, последствия ударного воздействия, зоны коррозии и т.п.). 2. Проведен анализ особенностей отражения, прохождения и рассеяния бегущих волн в структурах с локальными</p>	<p>Итоговый отчет, статьи в научных журналах и сборниках трудов международных конференций, монография по динамике упругих волноводов, кандидатская и докторская диссертации, свидетельства о регистрации компьютерных программ, заявка на регистрацию полезной модели (прототип SHM системы) .</p>

Год	Содержание выполняемых работ	Ожидаемые результаты	Перечень документов, разрабатываемых на этапе
	<p>рассеиватели, метод слоистых элементов (МСЭ). Разработка и компьютерная реализация МСЭ для расчета дифракции бегущих волн на локальных неоднородностях (дефектах) произвольной конфигурации; верификация МСЭ моделей на базе тестовых конечно-элементных (МКЭ) расчетов и экспериментальных измерений. 3. Гибридные схемы. Разработка, реализация и верификация расчетных схем, включающих дискретизацию ограниченной окрестности дефекта с помощью МКЭ, сопряженную с аналитическими представлениями для уходящих от источника волн во внешней области, полученными на базе явных интегральных и асимптотических представлений решения соответствующих краевых задач. 4. Анализ особенностей отражения, прохождения и рассеяния бегущих волн в структурах с локальными неоднородностями: частотные зависимости коэффициентов отражения, прохождения и конвертации мод Лэмба в упругом волноводе с внутренними дефектами (трещины, полости, включения); волноводы с поверхностными углублениями и ступеньками, моделирующими зоны, пораженные коррозией; пространственное рассеяние; прохождение волн через систему препятствий. 5. Резонансные эффекты и ловушечные моды: анализ распределения резонансных полюсов рассеяния (спектральных точек соответствующих краевых задач дифракции) в комплексной плоскости частоты в зависимости от размеров и формы рассеивателей различного типа с целью выявления индивидуальных признаков для идентификации дефекта по картине резонансного рассеяния; анализ эффекта ловушечных мод – локализации нестационарного волнового поля в окрестности дефекта на резонансных частотах. 6. Проведение численного и</p>	<p>неоднородностями, получены частотные зависимости коэффициентов отражения, прохождения и конвертации мод Лэмба, исследованы характерные особенности прохождения волн через систему препятствий. Проведена экспериментальная проверка эффектов, выявленных теоретически. 3. Проведен параметрический анализ зависимости характеристик возбуждаемых бегущих волн от изменения упругих свойств композитных материалов и на этой основе выработаны рекомендации по волновому контролю процесса деградации свойств материала в процессе эксплуатации. 4. Экспериментально изучено проявление теоретически предсказанного резонансного эффекта ловушечных мод, возникающего на определенных частотах при дифракции бегущих волн на локальных неоднородностях. Проведен анализ зависимости резонансных полюсов (частот) рассеяния от размеров и формы дефектов-рассеивателей различного типа. Сделана оценка возможности использования конкретной картины распределения резонансных частот каждого дефекта для регуляризации решения основной обратной задачи неразрушающего контроля – восстановление размеров и формы дефекта по рассеянному полю. 5. Интеграция разработанных на данном и предыдущих этапах компьютерных моделей и экспериментально-измерительных стендов в прототипы (программно-аппаратные комплексы) систем ультразвукового мониторинга образцов из металлов и слоистых композитных материалов.</p>	

Год	Содержание выполняемых работ	Ожидаемые результаты	Перечень документов, разрабатываемых на этапе
	экспериментального параметрического анализа и выработка на этой основе методологии контроля степени деградации в процессе эксплуатации упругих свойств материала конструкции по изменению характеристик возбуждаемых бегущих волн.		

Участник конкурсного отбора

  
/Е.В. Глушков

**ФОРМА 6. ПОКАЗАТЕЛИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЕКТА**

(регистрационный номер заявки 9.1022.2017/ПЧ )

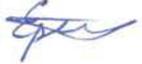
№ п/п	Наименование показателя	Год		
		2017	2018	2019
	<b>Основные показатели</b>			
1	Количество созданных в рамках реализации проекта результатов интеллектуальной деятельности, имеющих государственную регистрацию и (или) правовую охрану в Российской Федерации, ед.	2	2	2
2	Количество лицензионных соглашений, заключенных с вузом на право использования полученных в рамках проекта результатов интеллектуальной деятельности, ед.	1	1	2
3	Количество статей в научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, ед.	2	4	3
	в том числе статей в научных журналах, входящих в первую и вторую квартили, ед.	1	2	1
4	Количество статей в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus, ед.	2	3	2
	в том числе статей в научных журналах, входящих в первую и вторую квартили, ед.	1	2	1
	<b>Дополнительные показатели</b>			
5	Количество диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, защищенных исполнителями проекта, ед.	0	2	1
6	Количество диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, защищенных исполнителями проекта, ед.	0	0	1

Участник конкурсного отбора


 /Е.В. Глушков

## ФОРМА 7. СОСТАВ И КВАЛИФИКАЦИЯ ЧЛЕНОВ НАУЧНОГО КОЛЛЕКТИВА ПРОЕКТА

(регистрационный номер заявки 9.1022.2017/ПЧ)

№ п/п	Фамилия, имя, отчество	Дата рождения	Ученая степень, звание	Категория	Структурное подразделение, должность	Номер личного кабинета в Карте российской науки	Доля рабочего времени, расходуемого на выполнение проекта	Подпись исполнителя*
1	Глушков Евгений Викторович	18.05.1953	доктор физико-математических наук, профессор	научный сотрудник	Институт математики, механики и информатики, главный научный сотрудник	00022818	100	
2	Евдокимов Александр Александрович	27.09.1991	без степени, без звания	аспирант	вычислительных технологий, аспирант	00067810	50	
3	Ерёмин Артём Александрович	23.06.1987	кандидат физико-математических наук, без звания	научный сотрудник	Институт математики, механики и информатики, старший научный сотрудник	00021964	100	
4	Мякишева Ольга Александровна	25.01.1992	без степени, без звания	аспирант	вычислительных технологий, аспирант	00067603	50	
5	Шпак Алиса Николаевна	14.08.1990	кандидат физико-математических наук, без звания	научный сотрудник	математики, механики и информатики, младший научный сотрудник	00069321	100	
6	Глушкова Наталья	19.07.1951	доктор физико-	научный сотрудник	математики, механики	00060068	100	

№ п/п	Фамилия, имя, отчество	Дата рождения	Ученая степень, звание	Категория	Структурное подразделение, должность	Номер личного кабинета в Карте российской науки	Доля рабочего времени, расходуемого на выполнение проекта	Подпись исполнителя*
	Вилениновна		математических наук, профессор		и информатики, главный научный сотрудник			
7	Фоменко Сергей Иванович	10.07.1981	кандидат физико-математических наук, без звания	профессорско-преподавательский состав	вычислительных технологий, доцент	00025968	50	
8	Голуб Михаил Владимирович	23.02.1982	кандидат физико-математических наук, доцент	научный сотрудник	Институт математики, механики и информатики, ведущий научный сотрудник	00013264	100	
9	Александров Андрей Анатольевич	31.12.1991	без степени, без звания	аспирант	вычислительных технологий, аспирант	00069447	50	
10	Дорошенко Ольга Валерьевна	04.12.1972	кандидат физико-математических наук, без звания	профессорско-преподавательский состав	прикладной математики, доцент	-	100	
11	Худоерко Валентина Александровна	14.02.1995	без степени, без звания	студент	математики и компьютерных наук, студентка	-	50	
12	Потапова Наталья Викторовна	19.09.1994	без степени, без звания	студент	математики и компьютерных наук, студентка	-	50	
13	Варелджан Михаил Владимирович	09.07.1994	без степени, без звания	студент	математики и компьютерных наук, студент	-	50	

№ п/п	Фамилия, имя, отчество	Дата рождения	Ученая степень, звание	Категория	Структурное подразделение, должность	Номер личного кабинета в Карте российской науки	Доля рабочего времени, расходуемого на выполнение проекта	Подпись исполнителя*
14	Новиков Олег Игоревич	09.04.1992	без степени, без звания	аспирант	вычислительных технологий, аспирант	–	50	
15	Смелков Сергей Леонидович	24.11.1993	без степени, без звания	студент	математики и компьютерных наук, студент	–	50	

\* С условиями Конкурса и действующей редакцией «Положения о конкурсном отборе научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации» ознакомлен(-на) и согласен(-на). Подтверждаю свое участие в конкурсе. Согласен(-на) на использование моих персональных данных для проведения экспертизы заявки и подготовки аналитических материалов по конкурсному отбору научных (научно-технических) проектов коллективов исследователей. Данное согласие может быть отозвано мною в письменной форме.

Начальник отдела кадров



 / В.И. Финкин

Участник конкурсного отбора

 / Е.В. Глушков

**ФОРМА 8. ХАРАКТЕРИСТИКА СТРУКТУРНОГО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ**

(регистрационный номер заявки 9.1022.2017/ПЧ )

Тип структурного подразделения (лаборатория, научно-образовательный центр и др.):	Научно-исследовательский институт
Наименование структурного подразделения:	Институт математики, механики и информатики КубГУ
Год создания структурного подразделения:	2002
Общая численность штатных работников структурного подразделения:	5

**Сведения о поддержке структурного подразделения (за последние 5 лет)**

№ п/п	Источник и форма поддержки структурного подразделения вуза	Период поддержки структурного подразделения вуза	Объем финансового обеспечения поддержки за период, млн. руб.
1	Задание № 1.189.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности "Математическое и компьютерное моделирование волновых процессов в приложении к проблемам развития инфокомму Государственное задание	07.2014 - 12.2016	15,0
2	РФФИ № 13-01-96516 р_юг_а, Возбуждение пьезоактивными элементами упругих волн в изотропных и анизотропных композитных волноводах и их дифракция на локальных неоднородностях Российский фонд фундаментальных исследований	01.2013 - 12.2015	2,0
3	РФФИ № 12-01-00320-а, Идентификация дефектов слоистых структур при волновом мониторинге Российский фонд фундаментальных исследований	01.2012 - 12.2014	1,6
4	РФФИ № 11-0-96508-р_юг_ц, Моделирование и анализ распространения упругих волн, возбуждаемых пьезоактивными элементами в анизотропных волноводах с неоднородностями Российский фонд фундаментальных исследований	01.2011 - 12.2012	0,6
5	РФФИ 11-01-904-0-Укр_ф_а, Волновые явления и эффективные динамические свойства слоистых и матричных упругих композитов с разнородными дефектам Международная программа (грант)	01.2011 - 12.2012	0,7
6	АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы" 2.1.1/1231, 2.1.1/10643, Разработка методов волнового мониторинга слоистых композитных материалов с микроструктурой и определения их эффективных динамических свойств Ведомственная целевая программа	01.2009 - 12.2011	5,7
7	Заказ-наряд № 149, Разработка методов определения эффективных динамических свойств слоистых композитных материалов с микроструктурой и методов их волнового мониторинга	01.2008 - 12.2012	1,2

№ п/п	Источник и форма поддержки структурного подразделения вуза	Период поддержки структурного подразделения вуза	Объем финансового обеспечения поддержки за период, млн. руб.
	Ведомственная целевая программа		
8	РФФИ 13-01-96520 р_юг_а, Распространение упругих волн и распределение энергии в функционально-градиентных, слоистых и цилиндрических волноводных структурах Российский фонд фундаментальных исследований	01.2013 - 12.2015	1,6
9	РФФИ № 14-08-00370, Волновой мониторинг состояния композитных материалов и тонкостенных конструкций с использованием активных пьезосенсоров Российский фонд фундаментальных исследований	01.2014 - 12.2016	1,6
10	РФФИ № 11-01-96509-р_юг_ц, Исследование волноводных свойств смарт структур с пленочными пьезо-покрытиями на диэлектрических высокоскоростных подложках Российский фонд фундаментальных исследований	01.2011 - 12.2012	0,6
11	РФФИ № 12-01-33011 мол_а_вед, Теоретико-экспериментальное решение обратных задач по восстановлению упругих свойств слоистых композитов и идентификации в них неоднородностей с применением упругих волн Лэмба Российский фонд фундаментальных исследований	01.2013 - 12.2014	3,8
12	ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России", г/к 14.740.11.0578, Моделирование динамического поведения композитных материалов с повреждениями, неоднородностями и зонами неидеального контакта: приложения в неразрушающем контроле Федеральная целевая программа	07.2010 - 10.2012	1,8
13	ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России", г/к 14.В37.21.0387, Волновая динамика слоистых фононных кристаллов: моделирование неповрежденных и поврежденных структур, фильтрационные и блокирующие свойства Федеральная целевая программа	03.2012 - 10.2013	1,4
14	Государственное задание № 11.9165.2014, Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия тонкого пьезоэлемента со слоистой упругой средой: приложения в мониторинге инженерных конструкций на основе бегущих упругих волн Государственное задание	01.2014 - 12.2014	0,4
15	Государственное задание № 11.9157.2014, Распространение упругих волн в поврежденных слоистых пьезоэлектрических фононных кристаллах Государственное задание	01.2014 - 12.2014	0,4
16	Государственное задание №11.9216.2014, Анализ волн Лэмба, возбуждаемых отклеенными круглыми пьезоэлектрическими сенсорами Государственное задание	01.2014 - 12.2014	0,4
17	Грант Президента РФ № 14.Z56.15.7154-МК, Волновая динамика периодических и почти периодических упругих структур Государственный фонд	01.2015 - 12.2016	1,2
18	РФФИ № 16-41-230744 р_а, Разработка методов определения и	01.2016	1,7

№ п/п	Источник и форма поддержки структурного подразделения вуза	Период поддержки структурного подразделения вуза	Объем финансового обеспечения поддержки за период, млн. руб.
	контроля физико-механических свойств композитных материалов на основе бегущих волн Российский фонд фундаментальных исследований	- 12.2018	
19	РФФИ № 16-41-230769 р_а, Разработка математических моделей для исследования волновых процессов в структурах с внутренними волноводами и пленочными покрытиями Российский фонд фундаментальных исследований	01.2016 - 12.2018	1,8

Участник конкурсного отбора

  
/Е.В. Глушков