Артём Семёнов: «Поликристаллическая сегнетопьезокерамика – материал будущего»

30 июня 2022 года решением диссертационного совета доценту Высшей школы механики и процессов управления Физико-механического института, старшему научному сотруднику Научно-образовательного центра «Цифровой инжиниринг в атомной и термоядерной энергетике» Передовой инженерной школы «Цифровой инжиниринг» СПбПУ Артёму Семёнову присуждена ученая степень доктора физико-математических наук. Его диссертация на тему «Многоуровневые модели сегнетоэлектроупругих материалов и их применение при решении краевых задач» подытожила 15-летний труд научных исследований в данной области. Об уникальных свойствах пьезокерамики, будущем смарт-материалов и своем видении современной механики Артём Семёнов рассказал нам в интервью.

- Артём Семёнович, какие у вас впечатления от прошедшей защиты?

- Меня пугали, что защита это невероятный стресс: будешь нервничать, не уложишься в регламент, всё забудешь, не сможешь ответить на каверзные вопросы. Но на моей защите сложилась очень дружелюбная атмосфера. Я ощущал себя словно на каком-то празднике, где я делюсь своими идеями, и у меня получается раскрыть их суть. Конечно, вопросов было много, и они были сложными, интересными и неожиданными, но конструктивными и направленными на понимание полученных научных результатов. Волноваться особенно не пришлось. И за это особое огромное спасибо также всем моим многочисленным многоуважаемым коллегам, друзьям и членам семьи, пришедшим поддержать меня в этот день.

- В отзывах оппонентов отмечается, что прикладные результаты диссертации можно квалифицировать как серьезное научное достижение. Вы согласны с такой оценкой?

- В диссертации предложен новый многоуровневый подход для описания нелинейного поведения поликристаллических и монокристаллических сегнетоэлектроупругих материалов при произвольном комбинированном многоосном переменном электромеханическом воздействии. Предложенная термодинамически согласованная трехуровневая модель трехмерного континуума позволяет объединить достижения микроструктурных и феноменологических моделей сегнетоэлектроупругого материала, учесть многофазное строение, анизотропию, взаимное влияние кристаллитов, эволюцию микроструктуры и наличие дефектов. Целью работы являлось описание во всей полноте поведения рассматриваемого класса материалов, а также разработка аналитических и численных методов решения актуальных для практики нелинейных краевых задач. Полученные с помощью разработанной модели новые результаты позволяют дать объяснение ряду принципиальных эффектов, таких как: доменное упрочнение, экстремальные свойства вблизи морфотропной фазовой границы, процессам усталости, старения и деэйджинга. Казалось бы, очень сложно предложить что-то новое серьезное в этой области после фундаментальных работ выдающихся отечественных ученых: нобелевского лауреата Виталия Лазаревича Гинзбурга, академика АН СССР Игоря Васильевича Курчатова, члена-корреспондента АН СССР Георгия Анатольевича Смоленского. Но совершенствование экспериментальных методов и использование современных методов моделирования иерархически упорядоченных эволюционирующих гетерогенных структур открывают возможности для более детального описания рассматриваемых процессов. Это очень обширное поле и для дальнейших

исследований. Сегнетоэлектроупругие материалы по-настоящему уникальны и заслуживают детального изучения.

- В чем заключается их уникальность?

- Материалы бывают разные: металлы, керамика, полимеры — и по-своему уникален каждый из них. Однако сегнетоэлектроупругий материал — поликристаллическая пьезокерамика — обладает по-настоящему фантастическими свойствами. Это так называемый смарт-материал, используемый в высокотехнологичных областях техники, являющийся активным и многофункциональным материалом. Он способен быть накопителем и излучателем энергии, элементом памяти, осуществлять интеллектуальные функции, являясь одновременно и сенсором, и актуатором. Пьезокерамика позволяет эффективно конвертировать энергию из механической в электрическую и наоборот, при этом демонстрировать наивысшие показатели в сравнении с другими материалами. И в этом смысле за таким материалом будущее.

- Интересно, как в жизни выглядит пьезокерамика?

- Как обычная керамика. Представьте обыкновенное фарфоровое блюдце. Вот примерно так же, только без эмали. Материал хрупкий и вопросы прочности и долговечности играют для него не последнюю роль.

- Как у вас возник интерес к этой теме?

- Всё началось с моей стажировки в Германии больше 15 лет назад. Американский профессор Боб МакМикинг (индекс Хирша 69) предложил поучаствовать в проекте по созданию пьезоэлектрического инжектора. У него была только идея, а у меня — вычислительная программа для решения нелинейных краевых задач для материалов с усложненными реологическими свойствами и необратимыми процессами деформирования. В нашу команду входил также немецкий профессор Херберт Бальке (индекс Хирша 20), и мы втроем начали работать над проектом, связанным с созданием многослойного пьезоэлектрического инжектора для дизельного двигателя. Мы разработали пьезоактуатор для Bosh/Siemens, обеспечивающий безаварийную работу при большом числе циклов. Дальше я уже по собственной инициативе стал углубляться в эту область, оставаясь неудовлетворенным точностью первых моделей и методов расчета. Стало очевидно, что нужно применять многоуровневый подход, спускаться все ниже и ниже в иерархии масштабных уровней — от макроуровня к мезо- и дальше на наноуровень, учитывать микроструктуру, ее эволюцию. Это оказалось очень интересным. И чем глубже погружаешься, тем точнее оказываются предсказания на макроуровне.

- Расскажите подробнее о проекте пьезоэлектрического инжектора.

- Нам всем известны индукционные, механические инжекторы, а пьезоэлектрический управляется электрическими сигналами. Это обеспечивает высокую точность дозирования топлива и скорость срабатывания. Благодаря этому инжектор обеспечивает многократный впрыск топлива во время прохождения одного рабочего цикла. Соответственно, это приводит к равномерному и эффективному сгоранию топлива и, как следствие этого, к повышению эффективности двигателя до 15% и экологичности до 30%. Во время нашей работы пришлось преодолеть много экспериментальных, теоретических и вычислительных проблем, но в результате всё получилось. Это были 2005–2006 годы, тогда пионерские версии пьезоэлектрических инжекторов можно было встретить только в «Формуле-1», а сейчас более половины мирового рынка таких инжекторов стали пьезоэлектрическими. И такой

толчок дали, в том числе, и наши исследования.

- Вы упомянули, что за сегнетоэлектроупругими материалами будущее. Можете привести примеры простого бытового применения?

- В настоящее время разрабатываются миниатюрные объективы с пьезоприводом, которые в разы легче, компактнее, быстрее, чем привычные нам микроэлектромоторы. Пьезоэлементы могут выступать активными гасителями колебаний. Например, решить проблему шума и вибрации автомобилей на большой скорости. Многочисленные пьезоэлементы наклеивают на крышу автомобиля, сенсоры диагностируют колебания, актуаторы в противофазе начинают гасить. Также гашение колебаний применяется и в спорте — в лыжах, в теннисных ракетках. В горных походах пьезоэлементы помогают туристам накапливать при движении электрическую энергию, которой хватает для работы мобильного телефона или фонаря в условиях отсутствия альтернативных источников электричества. В японском метро придумана система: люди встают на ступени, вырабатывается энергия, которая идет на подсветку вестибюля. Особо следует отметить очень важную область применения — использование рассматриваемых материалов в качестве рабочих элементов систем мониторинга состояния (structural health monitoring) особо ответственных сооружений, таких как объекты атомной и термоядерной энергетики, большепролетные мосты, уникальные высотные здания. Перспективными считаются разработки энергонезависимой памяти для компьютеров и мобильных носителей, обладающей рекордными характеристиками плотности хранения информации и быстродействия переключения. В электронике также они используются в качестве пьезотрансформаторов, пьезоприемников для гидроакустики и сейсморазведки, пьезогироскопов, фильтров и резонаторов. Традиционным для пьезоматериалов является их применение в качестве нанопозиционеров, в частности в качестве приводов сканирующих туннельных микроскопов. В медицине определить пол ребенка и особенности его развития на пренатальной стадии помогает все тот же пьезоэффект, являющийся основой УЗИ. Пьезоэлементы получили распространение также в качестве электронных измерителей артериального давления и генераторов озона. В последнее время экспериментально обнаружена уникальная способность вырабатывать пьезоэлектричество деревьями и даже спинным мозгом человека. В целом могу сказать, что интерес науки к этой теме и ареал практических приложений неуклонно растет.

- То есть, это некий новый уровень современной механики?

- Вопрос актуален в контексте общей дискуссии: в каком направлении развивается современная механика? Некоторые пессимисты считают, что она уже практически исчерпала себя. Но мне кажется, что у нее есть два перспективных атрибута/направления развития: мультимасштабность и мультидисциплинарность. Мультимасштабность в механике деформируемого твердого тела проявляется в необходимости учета процессов, происходящих на мезо-, микро-, наноуровнях. Многие современные проекты требуют выполнения междисциплинарных научных исследований: учета взаимного влияния тепловых, электрических, магнитных полей, диффузии, фазовых и химических превращений на процессы деформирования. На стыке этих дисциплин рождаются новые теории, модели, приложения и пути развития, в которых механика играет ключевую роль.

- Вы стремились своими научными результатами внести вклад в развитие этих направлений или работали в большей степени для себя, из познавательного интереса?

- Да, действительно, я не особенно торопился с защитой, это правда. По сути, всё исследование растянулось на долгие полтора десятка лет. Я уже прошел тот возраст, в котором написание докторской диссертации считается престижным, важным и необходимым. Мне было интересно довести выбранную тематику до логического завершения, решить ряд фундаментальных вопросов. Я работал преимущественно в формате создания монографии. Сократив имеющийся объем диссертации 470 страниц до страниц 300, я надеюсь, получить достойный внимания читателя печатный труд.

- Какую роль в достижении успеха сыграла поддержка родной кафедры?

- Исключительную роль, и не только в написании диссертации, но, прежде всего, в формировании у меня качеств исследователя, ученого и педагога. Хочется выразить слова огромной благодарности сотрудникам кафедры «Механика и процессы управления», моим учителям и коллегам за перманентную помощь и поддержку. Оглядываясь в прошлое, могу с уверенностью утверждать, что образцом научно-педагогического коллектива для меня является кафедра «Механика и процессы управления» ЛПИ конца 80-х годов. Это был не просто признанный в мире центр фундаментального и прикладного образования и научных исследований в области механики, но и дружный коллектив выдающихся единомышленников. В то время кафедру возглавлял профессор, доктор физико-математических наук Владимир Александрович Пальмов, бывший также деканом физико-механического факультета. Лекции нам читали замечательные профессора и очень интересные яркие люди: Анатолий Аркадьевич Первозванский, Павел Андреевич Жилин, Владимир Маркович Фридман, Виктор Алексеевич Пупырев, Владимир Васильевич Елисеев, Олег Юрьевич Кульчицкий, Юрий Григорьевич Исполов, Сергей Фёдорович Бурдаков, Борис Александрович Смольников, Виктор Нилович Наумов, Лев Васильевич Штукин, Алексей Иванович Боровков, Камил Шамсутдинович Ходжаев, Александр Константинович Беляев, Николай Николаевич Лебедев. Председателем государственной экзаменационной комиссии был тогда член-корреспондент РАН, директор Института машиноведения РАН Дмитрий Анатольевич Индейцев, сменивший в 2013 году Владимира Александровича Пальмова на посту заведующего кафедрой.

- Очевидно, что стремление к исследованиям зародилось у вас буквально с первыми шагами в науке?

- Мои первые шаги в науке были инициированы тогда еще молодым доцентом кафедры МПУ Алексеем Ивановичем Боровковым, который предложил мне поработать на кафедре на летней практике после третьего курса и увлек на многие годы проблемами зарождающегося тогда нового направления — вычислительной механики, открывающей возможности поиска решений сложных линейных и нелинейных краевых задач с нетривиальной геометрией. Кроме передовых вычислительных технологий и умения решать актуальные для практики задачи, Алексей Иванович научил нас еще и визионерским качествам, ответственности за полученный результат, синергии работы в команде, вере в себя и стремлению делать всё с максимальной отдачей, что впоследствии мне очень пригодилось. Важности проверки теории и результатов расчетов экспериментальными исследованиями научил меня Борис Евгеньевич Мельников, заведующий кафедрой сопротивления материалов, тоже выпускник кафедры МПУ. Тесное и плодотворное общение с многими выдающимися учеными «школы Лурье», их глубокие знания, элегантность и смелость решения сложнейших проблем, сам дух кафедры Анатолия Исаковича Лурье породили во мне неугасимый интерес к научным исследованиям, трудолюбие и смелость защитить кандидатскую, а затем и докторскую диссертации.

- Так все-таки нужна смелость тем, кто ставит цель — стать кандидатом, а потом и доктором наук?

- Основанием для смелости являются результаты упорного кропотливого труда, яркость и новизна тематики исследования, актуальность полученных результатов для практики. Нужна сильная мотивация, чтобы пожертвовать частью жизни. Важно почувствовать внутри себя неукротимое желание решить проблему, ощутить себя хоть на миг первооткрывателем, сохранить до конца веру в успех своего дела, честно претерпеть муки творчества и неизбежно познать радость откровения!

Материал подготовлен Центром НТИ СПбПУ