

УДК 531, 539.4, 521

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ

Е.Н. ЧумаченкоМосковский институт электроники
и математики НИУ ВШЭ

В статье обсуждаются некоторые результаты деятельности членов научно-технологического направления РАЕН по Отделению анализа инновационных технологий, систем и процессов. Представлены исследования в области машиностроения, металлургии, авиакосмических технологий.

Ключевые слова: *машиностроение, металлургия, математическое моделирование, анализ и прогноз, небесные тела, космос, инновационные технологии.*

ВВЕДЕНИЕ

Техническая и технологическая модернизация металлургического и машиностроительного комплексов — основа развития экономики страны. Именно металлургия и машиностроение могут и должны стать главным плацдармом подъема экономики России и придания ей инновационного характера.

К сожалению, говорить о наличии в стране общего системного стратегического подхода к модернизации этих отраслей не приходится. Главная причина такого положения заключается, в первую очередь, в непродуманной кадровой политике. В составе руководства и металлургической, и машиностроительной отраслей появились так называемые топ-менеджеры, уровень некомпетентности которых в области науки и технологии просто поражает. Многие руководители реальных производств весьма отдаленно представляют себе даже простейшие технологические процессы в руководимом ими предприятии.

Неэффективность кадровой политики проявляется и в непривлекательном имидже технического образования, что не способствует притоку квалифицированных и талантливых специалистов в сферу промышленного производства, научно-технической и технологической деятельности.

С этими специальностями сложилась абсолютно неестественная ситуация. На одного технического

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

E.N. CHUMACHENKO

In article some results of activity of members of a scientific-technological direction of the Russian Academy of Natural Sciences on branch of the analysis of innovative technologies, systems and processes are discussed. Researches in the field of mechanical engineering, metallurgy, aerospace technologies are presented.

KEYWORDS: *mechanical engineering, metallurgy, mathematical modelling, the analysis and the forecast, heavenly bodies, space, innovative technologies.*

аспиранта или докторанта у нас приходится до десяти экономистов. Но ведь экономисты должны помогать работать техническим специалистам, а не паразитировать на проблемах государства. В стране созданы сотни экономических вузов и университетов с сомнительными научными школами. В среде руководства этих экономических университетов, законодателей нынешнего образования, активно культивируется и потом распространяется мнение, что нам не нужно столько технических специалистов и что наша подготовка инженеров якобы не отвечает современным требованиям.

Процесс реформирования высшей технической школы в условиях стремления минимизировать расходы на образование превратился в борьбу за существование. Разрушается материально-техническая и исследовательская база инженерных вузов, сокращается их профессорско-преподавательский состав, резко уменьшился приток молодых ученых.

Такая научно-техническая политика привела к самым губительным последствиям. По уровню квалификации кадров Россия оказалась на 39–40 месте. Число высококвалифицированных специалистов только в оборонных НИИ, КБ и на предприятиях сократилось почти в 10 раз, а реальная заработная плата упала в несколько раз. Набрал силу процесс «утечки умов» за рубеж. Отказ от

базовых принципов отечественной технической школы России привел к катастрофическим для нее последствиям.

Несмотря на ежегодные декларации, о ценности человеческого капитала и необходимости построения экономики, опирающейся на наукоемкие технологии и высокий уровень знаний, мы и сегодня продолжаем интенсивно наращивать добычу сырья, инвестируя миллиарды долларов в энергетический комплекс при непрекращающемся сокращении доли обрабатывающих отраслей.

Безусловно, мы все еще обладаем талантливыми и хорошо образованными представителями технической интеллигенции. Мы до сих пор сохраняем в ряде отраслей технологические навыки и компетенции, в основном благодаря заметно обветшавшему советскому багажу. Сегодня совершенно очевидно, что если не удастся остановить уничтожение уникальной российской технической образовательной школы, ни о каком развитии инновационных технологий в наукоемких отраслях промышленности говорить скоро не придется.

С целью содействия реализации интеллектуально-го потенциала российских ученых в разработке новых подходов к решению наукоемких технологических проблем, широкого использования информационных технологий, приемов математического и компьютерного моделирования для решения задач проектирования, планирования, оптимизации, энергосбережения и промышленного освоения инновационных технологий, систем и процессов, в рамках научно-технологического направления РАЕН было создано отделение «Анализ инновационных технологий, систем и процессов» [19].

На некоторых результатах деятельности и исследованиях этого отделения, связанных с анализом и разработкой перспективных наукоемких технологий, остановимся ниже.

ФЛАТТЕР В ЛОПАТКАХ КОМПРЕССОРА И ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Развитие современной газотурбинной техники характеризуется сокращением количества ступеней в компрессоре и турбине с сохранением достигнутых параметров процесса, что приводит к повышению аэродинамических, температурных и статических нагрузок, приходящихся на лопатки роторов ступеней компрессора и турбины. В компрессорах все большее применение находят широкохордные рабочие лопатки, позволяющие получить более высокие степени сжатия в одной ступени. Вместе с тем, работа таких лопаток в двигателе сопряжена с высокой степенью опасности возникновения развитых колебаний

(флаттера), обусловленных нелинейным аэроупругим взаимодействием между лопатками и набегающим потоком в рабочем колесе и приводящих к быстрому усталостному разрушению лопаток. В настоящее время не создано теории и методов, позволяющих на стадии проектирования надежно предсказывать условия возникновения флаттера и осуществлять отстройку лопаток от этих режимов с использованием расчетных методов. В связи с этим, исследования условий возникновения и проверка мероприятий по отстройке флаттера лопаток проводятся экспериментальными методами, путем натурных дорогостоящих испытаний полноразмерных двигателей или узлов компрессора и турбины. В настоящее время на теоретическое исследование этой проблемы в газотурбостроении и создание расчетных методов прогнозирования и отстройки от флаттера направлены значительные усилия ученых и инженеров, как в нашей стране, так и за рубежом.

Для решения этой задачи был использован «энергетический метод», в соответствии с которым вычисляется работа нестационарных аэродинамических сил на упругих перемещениях лопатки при ее колебаниях по одной из собственных форм, характерных для рассматриваемого рабочего колеса компрессора или турбины. Знак вычисленной работы определяет характер возникающих колебаний. В случае получения положительной работы колебания лопаток носят характер флаттера и амплитуда этих колебаний может возрастать очень быстро, вплоть до быстрого усталостного разрушения лопатки. Разработанный метод базируется на использовании расчетного комплекса ANSYS для определения собственных частот и форм колебаний исследуемого колеса, и комплекса CFX ANSYS для определения полей нестационарных давлений в межлопаточных каналах, геометрия которых изменяется вследствие колебаний лопаток по собственной форме. В этом же комплексе вычисляется работа нестационарных аэродинамических сил на упругих перемещениях колеблющихся лопаток. Задача решается в пространственной постановке. Поле перемещений колеблющейся по собственной форме лопатки аппроксимируется полиномом Лагранжа десятого порядка, обеспечивающим достаточную точность описания перемещений лопатки.

Предложенная методика всесторонне подтверждена испытаниями на флаттер лопаток вентилятора в составе полноразмерного двигателя и на специальных стендах и установках. Основные результаты исследований опубликованы в работах [7–9, 14] и доложены на двух международных конференциях. Разработанная методика внедрена в практику проектирования вентиляторов и компрессоров современных газотурбинных двигателей в ФГУП «Центр газотурбостроения «Салют».

АНАЛИЗ ПРОБИВАЕМОСТИ КОРПУСОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ОБРЫВЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК

Важнейшим требованием по обеспечению безопасности авиационных газотурбинных двигателей является необходимость локализации разрушений двигателя внутри его корпусов при обрыве рабочих лопаток. Задача о взаимодействии оборвавшейся лопатки с корпусом и определение условий пробиваемости корпуса исследованы недостаточно. Основные критерии пробиваемости корпусов оборвавшейся лопаткой, как в отечественном двигателестроении, так и в мировом сформулированы на базе проведения дорогостоящих натурных экспериментов, что определяет возможность их корректного применения только в случае использования тех же материалов и конструкций лопаток и корпусов, что и в прямом эксперименте. Основной задачей настоящих исследований являлось создание метода расчетного анализа пробиваемости корпусов двигателя при обрыве лопаток вентилятора и осуществление его программной реализации.

Рассматриваемая задача является междисциплинарной, включающей в себя анализ баллистической траектории оторвавшегося фрагмента лопатки, его взаимодействия с соседними лопатками и корпусом; исследование механизмов трения и деформирования материалов корпуса и фрагментов лопатки; исследование температурного состояния в зоне контакта; формулирование критерия пробиваемости.

Традиционно, эту проблему стремились решить путем построения единого критерия типа критерия Джонсона-Кука, включающего большое количество констант, определение которых требует проведения специальных дорогостоящих экспериментов. Однако экспериментальная проверка этих критериев указывала на ограниченность области, где результаты использования этих критериев достаточно хорошо совпадали с результатами экспериментов. В связи с этим, в настоящей работе решение этой задачи искали в виде построения компьютерной экспертной системы (КЭС), включающей блок материальных моделей, блок контактных моделей, блок дискретизации конструкций. Блок материальных моделей включает в себя описание диаграмм деформирования материалов лопаток и корпусов в широком диапазоне скоростей деформирования, температур и траекторий нагружения, а также предельных значений относительных удлинения и сужения, соответствующих разрушению в рассматриваемых условиях. Определение этих характеристик проводилось по методу Кольского с использованием разрезных стержней Гипконсона (РСГ). Испытания материалов проводились в НИИ механики РГУ им. Н.И. Лобачевского. Для оценки влияния сложности напряженного состояния и траекторий деформирования испытаниям подвергались образцы с надрезом. В результате этих испытаний была сформирована

база материальных моделей, которая использовалась в созданной КЭС. Блок контактных моделей для исследуемых материалов был создан на базе результатов испытаний образцов на специализированном верификационном стенде для определения параметров закона трения на основе модифицированного метода РСГ, разработанном и реализованном в НИИ механики НГУ А.М. Браговым и А.К. Ломуновым. В блоке дискретизации конструкции использованы модели UG NX и препроцессор LS-DYNA. КЭС построена в виде итерационного процесса, включающего:

- определение баллистической траектории оборвавшегося фрагмента лопатки;
- исследование взаимодействия оборвавшегося фрагмента лопатки с корпусом и соседними лопатками. Определение локальных термомеханических состояний (ТМС) с использованием моделей деформирования, полученных для соответствующих скоростей деформирования и температуры;
- сопоставление расчетных параметров локального ТМС с предельным для данного локального ТМС параметрами, и формирование на основе этого сравнения заключения о пробиваемости корпуса.

Верификация разработанного комплекса для анализа корпусов проведена по результатам прямых испытаний по пробиванию преград. Комплекс был использован для оптимизации конструкции вентилятора газотурбинного двигателя, а также для разработки конструкции корпуса с защитной намоткой из композиционного материала. Исследовано влияние пропитки нанокompозитной жидкостью многослойной композитной преграды на ее характеристики пробиваемости [3]. Разработанный подход к оценке пробиваемости корпусов внедрен в практику проектирования корпусов в ФГУП «Центр газотурбостроения «Салют».

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНИКЕ И ЭКОНОМИКЕ

В рамках этого направления проведен ряд исследований, в которых анализируются общие для многих приложений нелинейные эффекты [15–17, 21].

В области технических и естественнонаучных приложений достигнута высокая степень соответствия результатов моделирования и поведения объектов-прототипов. В области экономических и социальных приложений можно говорить только о качественном совпадении – поведение реальной системы и решение модели содержат одинаковые качественные эффекты, но не достигнуто количественное совпадение. Основной причиной такого ухудшения качества моделирования по мере перехода объектов-прототипов от естественнонаучных и технических приложений к социальным системам является усложнение систем и связанные с этим два дополнительных фактора.

Первый из них – достоверность исходных данных. В естественнонаучных и технических системах она весьма высокая, определяется с требуемым уровнем точности. Исходные данные для экономического и социально-экономического моделирования гораздо менее достоверны. Доля теневой экономики России оценивается разными авторами от 16 [22] до 48% [23]. Естественно, при таком разбросе даже доли не учитываемой в исходных данных продукции и услуг сложно ожидать количественного совпадения в поведении реальной системы и модели.

Второй фактор, определяющий трудности в получении количественного совпадения результатов моделирования для экономических и социальных систем – роль информации в качестве внешнего воздействия на систему. Выступления лидеров финансового рынка всегда являются управляющим воздействием на поведение соответствующих индикаторов. Аналогичный эффект влияния информации наблюдается и для социальных систем. Причем это влияние заметно усиливается с развитием технических средств передачи информации. Становится возможным использовать информационное или дезинформационное внешнее воздействие для управления системой наряду с экономическими факторами. А более простые технические, естественнонаучные, метеорологические системы совершенно не подвержены информационному влиянию и развиваются в соответствии с объективными законами.

По-видимому, именно упомянутые два фактора являются причиной того, что в технике нелинейные эффекты рассчитываются с достаточной степенью точности, в экономике и социальных науках наблюдается только качественное совпадение.

Нелинейные динамические системы даже в моделях с одной степенью свободы проявляют многочисленные эффекты. Если же рассматривать системы с несколькими степенями свободы, нелинейные эффекты видоизменяются и усложняются. В частности, появляется эффект взаимного влияния различных форм и видов колебаний. Сложные вопросы взаимодействия различных форм и видов колебаний в многомерных нелинейных динамических системах были исследованы и представлены в докладе на шестой международной конференции по динамическим системам и их приложениям (Sixth International Conference on Dynamic Systems and Applications) г. Атланта, США.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Формоизменение материалов в условиях неполной кристаллизации [13, 18]. Деформирование непрерывной заготовки в условиях неполной кристаллизации обеспечивает не только возможность управления толщиной слитка, что очень важно при регулировании толщины подката на тонкослябовых литейно-прокатных модулях, но и гарантирует подавление осевой

пористости и ликвации при разливке качественных марок стали. Суть метода «мягкого» обжата непрерывной заготовки состоит в плавном обжате в условиях неполной кристаллизации, т.е. в зоне, в сечении которой присутствуют жидкая и твердая фазы.

Для осуществления операций, особенно востребованных промышленностью высокопрочных и труднодеформируемых сталей, актуальным остается определение участков для реализации «мягкого» обжата и температурно-скоростных параметров деформирования. Для изучения процесса выполнены физические исследования на модельных образцах и математическое моделирование проникновения деформации в материал, находящийся в зоне деформирования в разных агрегатных состояниях. Предложен новый оригинальный метод исследования процесса «мягкого обжата». В его основе физическая модель сляба, представляющая замкнутую твердотельную оболочку, выполненную из тарированной свинцовой дроби и сплава Вуда. Для имитации жидкого расплава металла внутреннее пространство оболочки заполнено желатином.

Математическое моделирование выполнено с использованием вычислительных систем Abacus, ANSYS, SPLEN [24] и др. Особое место в моделировании отведено описанию поведения материалов при различных условиях термомеханического воздействия. Для этого спланирована и осуществлена серия пластометрических экспериментов на комплексе Gleeble 3800 с модулями Hydrowedge и Pocket Jaw, направленная на изучение поведения при горячей деформации механических характеристик высокопрочной низколегированной автомобильной стали HC420LA. Полученные характеристики использованы для адаптации математических моделей.

Формообразование проката заданной точности [1–2, 4, 12]. В настоящее время к качеству листового проката предъявляются все более высокие требования, в том числе по точности геометрических размеров. Одной из важных характеристик является продольная и поперечная разнотолщинность проката.

Формирование продольной разнотолщинности обусловлено действием в процессе прокатки полос в стане холодной прокатки различных источников возмущения. Наложение возмущений различной природы в широком диапазоне частот определяет величину продольной разнотолщинности готового проката. Одним из основополагающих источников возмущения, наряду с изменением скоростей вращения рабочих валков, биением шпинделей, моталок и подшипников прокатных валков, колебанием геометрических характеристик подката, неравномерностью механических свойств металла по длине полос является биение бочек опорных и рабочих валков относительно шеек. Биение прокатных валков способствует возникновению колебаний межклетевого натяжения, что приво-

дит к возникновению циклической продольной разнотолщинности полосы при прохождении каждой клетки стана.

Разработан метод, позволяющий с высокой точностью идентифицировать источники возмущения колебаний толщины и оценить степень их влияния на продольную разнотолщинность холоднокатаного проката. Метод основан на определении частот периодических составляющих отклонений толщины проката и сопоставлении их с частотами в спектре колебаний толщины, определяемыми посредством спектрального (Фурье) анализа. Оценка степени влияния различных составляющих продольных колебаний толщины выполнена путем определения их доли в суммарной спектральной плотности разнотолщинности. Контроль данного показателя и селективное формирование комплектов прокатных валков с наилучшими показателями, является одним из условий выполнения заказов на прокат повышенной точности. В результате выполненных исследований установлено, что для получения при холодной прокатке на непрерывном четырех клетевом стане электротехнической изотропной стали с продольной разнотолщинностью на уровне 20 мкм (на стационарном участке прокатки) необходимо применять комплекты (пары) опорных валков с величиной суммарного радиального биения в центральной части поверхности бочек ≤ 20 мкм.

Исследование и совершенствование технологии холодной прокатки низколегированных высокопрочных автомобильных сталей [11]. В последние годы низколегированные высокопрочные стали (HSLA) находят широкое применение в машиностроении и автомобилестроении. Область их применения обусловлена высокими механическими свойствами (условный предел текучести до 520 МПа), что позволяет снижать вес металлоконструкций при сохранении их прочности (экономия металла по сравнению с конструкциями из малоуглеродистых сталей составляет 25–30%).

Конечная геометрия (толщина, ширина, плоскостность) и качество поверхности полос из HSLA сталей, необходимые для автомобилестроения, достигаются в результате холодной прокатки. Производительность и стабильность процесса холодной деформации определяются составом оборудования стана и механическими свойствами стали. Упрочнение в результате наклепа сталей HSLA в процессе холодной тонколистовой прокатки может достигать 1000 МПа и более. Закономерности и интенсивность упрочнения HSLA сталей в процессе холодной деформации недостаточно изучены и слабо освещены в научной литературе. Поэтому при холодной прокатке низколегированных сталей возникают аварийные ситуации, приводящие к простоям, потере производительности стана и снижению качества проката. Наличие информации о сопротивлении деформации горячекатаного под-

ката низколегированных сталей и знание параметров кривой упрочнения в процессе холодной прокатки способствует снижению издержек при выполнении заказов потребителей за счет предварительного выбора режимов обработки.

По итогам экспериментальных исследований и практического опыта производства построены регрессионные уравнения для определения механических свойств горячекатаного подката листовой стали марок HC260LA, HC300LA, HC380LA, HC420LA в зависимости от химического состава и параметров горячей прокатки. Данные уравнения позволяют оперативно (без проведения механических испытаний) прогнозировать условный предел текучести подката высокопрочных низколегированных автомобильных сталей, необходимый для назначения технологических параметров начальной настройки стана холодной прокатки. Достоверность регрессионных зависимостей составляет 74–96%.

Разработана численная методика расчета параметров холодной прокатки, дополненная процедурой адаптивного определения коэффициентов кривой наклепа прокатываемой стали и основанная на экспериментальных данных, подтвержденных практическим опытом. Процедура адаптации учитывает влияние на энергосиловые параметры прокатки условий трения стана и изменение пластических свойств стали от температуры полосы. Методика позволяет рассчитать усилие прокатки, момент прокатки, мощность прокатки каждой из клеток стана, кривую упрочнения стали при деформации, предназначена для инженерной оценки возможности обработки различных типоразмеров проката, как низколегированных высокопрочных сталей, так и других сталей при заданном составе и характеристиках оборудования. Результаты работы внедрены в производственную деятельность ОАО «НЛМК».

Контроль качества поверхности листового проката [10]. Отдельной позицией качества выступает состояние поверхности проката. Наиболее массовое применение контроля поверхности осуществляется на завершающих переделах производства металлопродукции (после холодной прокатки, травления, отжига, нанесения покрытий и т.д.). Это исключает поставку потребителю продукции, не отвечающей его требованиям. Однако, чем глубже передел на котором обнаружены такие несоответствия, тем выше потери от брака, и поэтому логично внедрение систем контроля на всех переделах. Продукции станов горячей прокатки, которая может быть и товарной продукцией и подкатом, свойственно наличие поверхностных дефектов как сталеплавильного, так и прокатного происхождения. Причем по внешним признакам на готовой продукции не всегда представляется возможным точно их идентифицировать. Основные методы, применяемые для обнаружения и изучения дефектов поверхности

листовой стали, визуальные – использующие внешний осмотр без или с применением специальных систем. Однако скорость полосы, ее температура и окисление поверхности затрудняют проведение инспекций. По этой причине, рулоны на предмет наличия дефектов проверяются, как правило, после остывания. Тем самым увеличивается объем несоответствующей продукции, особенно когда дефект имеет прокатное происхождение (например, периодический отпечаток от рабочего вала).

На непрерывном стане горячей прокатки 2000 ОАО «НЛМК» впервые в отечественной практике была смонтирована система, которая обеспечивает 100% контроль поверхности проката (верхней и нижней стороны), автоматически обнаруживает и классифицирует дефекты полосы в режиме реального времени. В реализации проекта кроме ОАО «НЛМК» участвовали фирмы SYTSCO AG, SIEMENS-VAI и Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ). После проведения гарантийных испытаний и достигнутые высокие проценты обнаружения и классификации поверхностных дефектов на горячем прокате, сформированный объем базы знаний и каталога цифровых изображений дефектов создали объективную основу для реализации задач, связанных с использованием результатов, полученных от СККП. В ЛГТУ было разработано программное обеспечение, выполненное в виде отдельных приложений.

Визуализация дефектов поверхности горячекатаных полос с привязкой к идентификатору рулона предназначена для сертификации горячекатаных рулонов и анализа возникновения дефектов в зависимости от плавки, партии, марки металла, режимов его прокатки и т.д. Алгоритмы, реализованные в приложениях, позволяют осуществлять анализ формирования поверхностных дефектов в режиме on-line для полос, прокатываемых на стане 2000, и в режиме off-line по архивным данным прокатанных полос. Это позволяет своевременно выявлять закономерности распределения дефектов, находить причины возникновения, предлагать меры по их устранению, тем самым уменьшить потери от брака и несоответствующей продукции.

Опыт внедрения системы контроля качества поверхности на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки, а также ее последующее использование показали, что автоматическое обнаружение и классификация поверхностных дефектов в сквозной технологии производства листового проката позволяет:

- гарантировать обеспечение требований потребителей по качеству поверхности проката с предоставлением электронного паспорта;
- обеспечить 100% контроль поверхности всех полос, прокатываемых на стане, для выявления дефектов разлива и горячей прокатки;
- обеспечить автоматизированные системы последующих переделов информацией о дефектах поверхности горячего проката;

- осуществлять слежение за качеством поверхности в смежных переделах;
- проводить аудит существующих технологий производства проката и разрабатывать мероприятия по их совершенствованию.

Управление технологией смежных с горячей прокаткой переделов с использованием результатов, полученных системой контроля качества поверхности, открывает хорошие перспективы по сокращению несоответствующей продукции и повышению эффективности производства.

ПРОБЛЕМЫ АСТЕРОИДНОЙ И КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ

Противодействие астероидной и кометной опасности (АКО), т.е. угрозе столкновения Земли с малыми телами Солнечной системы (астероидами и кометами с размером, превышающим несколько десятков метров) с причинением серьезного ущерба населению планеты, вплоть до уничтожения человечества представляет собой проблему, необходимость решения которой является в настоящее время общепризнанной.

Недавнее событие в небе над Челябинском как будто специально подчеркнуло ее актуальность. Предлагаются различные способы изменения орбиты астероидов с целью предотвращения их столкновения с Землей: изменение отражательных характеристик поверхности астероида (изменение альбедо), применение так называемого гравитационного буксира, когда траектория астероида изменяется за счет гравитационного воздействия со стороны космического аппарата, наведение космического аппарата на астероид с последующим столкновением с ним.

Во всех этих случаях, за исключением воздействия мощного ядерного взрыва, изменение параметров орбиты астероида очень мало и сопоставимо с уровнем погрешности определения параметров орбиты самого астероида.

В Институте космических исследований РАН, совместно с Лабораторией космических исследований МИЭМ НИУ ВШЭ, была разработана концепция, радикально отличающаяся от перечисленных выше, – изменение орбиты опасного для Земли астероида путем направления на него другого, меньшего во много раз по размеру, астероида-снаряда [5–6, 20].

Собственно, идея так называемого «космического билиарда» обсуждается уже более 20 лет. При этом удар по опасному небесному телу (ОНТ) осуществляется управляемым небольшим астероидом-снарядом, для которым предлагается использовать ракетный двигатель небольшой мощности. Эта идея, впрочем, крайне трудно реализуема. Ведь для того, чтобы изменить траекторию даже небольшого по космическим меркам астероида с целью его наведения на ОНТ,

требуются огромные затраты рабочего тела, которые оцениваются как нереальные для современной ракетной техники. Суть же предлагаемого способа состоит в использовании гравитационного маневра около Земли для того, чтобы направить относительно небольшой астероид-снаряд (10–15 м) на ОНТ. Управление ударником состоит в заблаговременном сообщении снаряду малого приращения скорости 3–15 м/с. После этого импульса малый астероид пролетает около Земли, совершая гравитационный маневр, эквивалентный сообщению астероиду импульса скорости до 7 км/с.

Таким образом, разработан метод изменения траекторий опасных астероидов, орбиты которых известны за несколько лет до возможного столкновения с Землей. Метод, опирающийся на использование небольших астероидов (астероидов-снарядов), направляемых на опасные небесные тела за счет придания снаряду импульса скорости, достаточно малого, но обеспечивающего возможность гравитационного маневра у Земли. В результате такого гравитационного маневра вектор движения астероида снаряда может управляемо меняться в широких пределах.

Для практической реализации этого метода потребуются заметные ресурсы и отработка пока еще не прошедших апробацию технологий в космосе, подтверждающих реализуемость предложенной концепции. Сделаны только первые шаги в этом направлении.

Однако исследования и даже разработка конкретных проектов уже сейчас ведутся довольно интенсивно. Например, в США серьезно рассматривается так называемый проект Кеск захвата малого космического тела (около 500 т) гравитационным полем Земли с использованием гравитационного маневра у Луны и «синхронизация его орбиты с орбитой Луны» [25].

По сообщению главы программы NASA по изучению околоземных объектов D. Yeomans проект может быть реализован уже в 2019 г. Мы полагаем, что исследования в этих направлениях весьма перспективны, поскольку дело касается решения важных практических задач защиты человечества от обсуждаемой космической угрозы, а также использования ресурсов космоса.

В настоящее время перед сотрудниками отделения стоит задача разработки новых вычислительных комплексов, которые могли бы эффективно использоваться для решения научно-исследовательских и прикладных задач, входящих в круг научных интересов отделения.

В ходе развития всех вышеперечисленных работ планируется подготовить квалифицированные кадры, опираясь на применение принципа: «learning science by doing science». Для этого в исследовательские группы включаются аспиранты и студенты, адъюнкты РАЕН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов А.А., Мазур И.П. Разработка модели для исследования теплового состояния рабочих валков станов горячей прокатки // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7, № 11.2. С. 83–86.
2. Астахов А.А., Мазур И.П. Станочное профилирование S-образных рабочих валков для компенсации тепловых и упругих деформаций валкового узла // Вестн. высших учебных заведений Черноземья. 2013. № 1. С. 58–63.
3. Антонов Ф.К., Моссаковский П.А., Колотников М.Е. Исследование процесса пробивания многослойной преграды из тканого композита с нанокompозитной пропиткой // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 10(67). С. 69–75.
4. Бельский С.М., Мазур И.П., Дождиков В.И., Васильев В.Б. Регулирование плоскостности прокатываемых полос на базе математической модели распределения продольных напряжений // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18, № 1. С. 17–22.
5. Данхэм Д.У., Назиров Р.Р., Фаркуар Р.У., Чумаченко Е.Н., Эйсмонт Н.А., Симонов А.В. Космические миссии и планетарная защита. М.: Физматлит, 2013. 276 с.
6. Данхэм Д.У., Рейтсема Х.Дж., Эд Лу, Арентц Р., Линфилд Р., Чапман К., Фаркуар Р., Ледков А., Эйсмонт Н., Чумаченко Е. Метод предупреждения столкновения малых астероидов с Землей // Астрономический вестник. 2013. Т. 47, № 4. С. 341–351.
7. Колотников М.Е., Веденеев В.В., Макаров П.В., Фирсанов В.В. Трехмерное моделирование флаттера лопаток компрессоров современных ГТД // Вестник СГАУ. 2011. №3(27). Ч. 1. С. 47–56.
8. Колотников М.Е., Макаров П.В. Один из подходов к оценке динамической напряженности лопаток вентилятора при тензометрировании // Вестник двигателестроения. 2009. № 3. С. 176–180.
9. Колотников М.Е., Макаров П.В., Сачин В.М. Исследование динамической напряженности широкохордного вентилятора при стендовых испытаниях // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 9 (56). С. 58–64.
10. Мазур И.П. Проблемы контроля качества поверхности при производстве листового проката // Сталь. 2011. № 4. С. 31–36.
11. Мазур И.П., Борисов С.С., Кавалек А. Исследование упрочнения труднодеформируемой стали типа HSLA при холодной прокатке // Производство проката. 2012. № 7. С. 8–13.
12. Мазур И.П., Жовнодий Н.Н., Астахов А.А., Кавалек А.А., Чабоненко А.А. Станочное про-

- филирование рабочих валков как способ регулирования поперечного профиля прокатываемых полос // Производство проката. 2013. № 5. С. 13–16.
13. **Мазур И.П., Смирнов Е.Н., Ручко В.Н., Черкашина Т.И., Демченко Д.О., Астахов А.А.** Патент RU № 2511130 С2. Способ обжата непрерывнолитой сортовой заготовки в жидко-твердом состоянии. Оpubл. 10.04.2014. Бюл. № 10.
 14. **Макаров П.В.** Автоматизация процесса обработки данных тензометрирования в программном комплексе WinПОС // Авиационно-космическая техника и технология. 2010. № 9 (76). С. 125–127.
 15. **Петров Л.Ф.** Методы динамического анализа экономики. М.: Инфра-М, 2010, 239 с.
 16. **Петров Л.Ф.** Методы нелинейной динамики как инструменты управления экономической эффективностью // Эффективное антикризисное управление. 2011. № 2. С. 58–67.
 17. **Петров Л.Ф.** Как перейти в новые измерения // Эффективное антикризисное управление. 2012. № 2. С. 50–54.
 18. **Смирнов Е.Н., Ручко В.Н., Смирнов А.Н., Мазур И.П., Демченко Д.О., Митьев А.П., Хобта А.С., Серов А.И.** Патент UA № 100334.
 19. **Чумаченко Е.Н.** Анализ, разработка и оптимизация инновационных технологий, систем и процессов // Вестник РАЕН. 2011. № 2. С. 35–41.
 20. **Эйсмонт Н.А., Боярский М.Н., Ледков А.А., Назиров Р.Р., Данхэм Д., Шустов Б.М.** О возможности наведения малых астероидов на опасные небесные объекты с использованием гравитационного маневра // Астрономический вестник. 2013. Т. 47. № 4. С. 352–360.
 21. **Petrov L.F.** Interactive optimization as a tool for finding the complex periodic solutions in nonlinear dynamics-Proceedings of III International conference on optimization methods and applications. Optima, 2012. P. 213–218.
 22. <http://news.rambler.ru/9471008/>, ссылка на данные Росстата.
 23. <http://www.forbes.ru/ekonomika-opinion/finansy/5-5507-tenevaya-grossiya>, ссылка на данные Всемирного банка.
 24. www.kommek.ru.
 25. <http://top.rbc.ru/society/06/04/2013/852809.shtml>.

Чумаченко Евгений Николаевич,
д.т.н., профессор, зав. кафедрой Московского института
электроники и математики НИУ ВШЭ

☎ 109028, г. Москва, Б. Трехсвятительский пер., д. 3,
тел.: +7 (495) 916-88-68, e-mail: echumachenko@hse.ru