

Д-р техн. наук В. З. Гришак

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ НА БАЗЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ И КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫХ ПОДХОДОВ. НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СТРАТЕГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Рассмотрены результаты исследований напряженно-деформированного состояния тонкостенных оболочечных конструкций на базе численных методов анализа, а также аналитических решений с использованием асимптотических подходов и метода начальных параметров в матричной форме при решении проблемы равной устойчивости подкрепленных отсеков комбинированных оболочечных систем ракетно-космической техники в рамках совместных исследований, проводимых коллективами ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля» и Запорожского национального университета. Основное внимание уделяется использованию прямых численных методов на базе конечноэлементных технологий и результатам исследований, при которых аналитические методы могут быть полезными на стадии предварительной оценки несущей способности силовых конструкций, а в ряде случаев и для рационального их проектирования. Следует заметить, что речь идет не о противопоставлении численных и аналитических подходов, а о возможности их эффективного использования. Приведены возможные направления использования современного машинного обучения (*Machine Learning Technology*) в области расчетно-экспериментальных методов определения характеристик РКТ.

Ключевые слова: численные и аналитические методы, напряженно-деформированное состояние, ракетные конструкции, оболочечная система, подкрепляющие силовые элементы, локальная и общая устойчивость, машинное обучение.

Розглянуто результати досліджень напружено-деформованого стану тонкостінних оболочкових конструкцій на базі числових методів аналізу, а також аналітичних рішень з використанням асимптотичних підходів і матричного методу початкових параметрів під час розв'язання проблеми однакової стійкості підкріплених відсіків комбінованих оболочкових систем ракетно-космічної техніки в межах спільних досліджень, які проводять колективи ДП «Конструкторське бюро «Південне ім. М. К. Янгеля» і Запорізького національного університету. Основну увагу приділено використанню прямих числових методів на базі скінченноелементних технологій і результатам досліджень, для яких аналітичні методи можуть бути корисними на стадії попередньої оцінки несучої здатності силових конструкцій, а в низці випадків і для раціонального їх проектування. Слід зауважити, що мова йде не про протиставлення числових та аналітичних підходів, а про можливість їх ефективного використання. Наведено можливі напрями використання сучасного машинного навчання (*Machine Learning Technology*) у сфері розрахунково-експериментальних методів визначення характеристик РКТ.

Ключові слова: числові й аналітичні методи, напружено-деформований стан, ракетні конструкції, оболочкова система, підкріпні силові елементи, локальна та загальна стійкість, машинне навчання.

This article analyzes the results of studies, which are based on numerical methods of analysis, of the stress-strain state of thin-walled shell structures. This article also discusses analytical solutions that apply asymptotic approaches and a method of initial parameters in a matrix form for solving a problem of equal stability of reinforced compartments of combined shell systems of the rocket and space technology within the scope of the research being carried out jointly by teams of Yuzhnoye State Design Office and Zaporizhzhya National University.

*The primary attention is paid to the use of FEM-based direct numerical methods and the research results for which analytical methods can be useful for making a preliminary assessment of the bearing capacity of load-bearing structures, and in some cases for their rational design. This article does not contrast numerical and analytical approaches but about the possibility of using them effectively. The article talks about possible ways of using the up-to-date technique of machine learning (*Machine Learning Technology*) in the calculation and experimental methods for determining the characteristics of the rocket and space technology.*

Key words: numerical and analytical methods, stress-strain state, rocket structures, shell system, reinforcing load-bearing elements, local and general stability, machine learning technology.

Результаты расчетов на прочность с использованием программного обеспечения на основе современных информационных конечноэлементных технологий

«Тысячи путей ведут к заблуждению, к истине – только один» (Жан Жак Руссо, 1712–1778) [1]. В поисках решений, ведущих к истине, актуальным является использование имеющихся в арсенале исследователей существующих и перспективных, с точки зрения тенденций развития науки и внутренних потребностей создания ракетно-космических систем с заданными свойствами, интеллектуальных и технических возможностей.

Как известно, в последнее время большое значение приобрели численные методы расчета на прочность, основанные на вариационных постановках. Среди них особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) благодаря универсальности его программной реализации и возможности создания автоматизированного цикла расчета с визуализацией процесса деформирования и разрушения [2–4]. Однако на пути решения задач методом конечных элементов существуют трудности, связанные с необходимостью выполнения определенных условий сходимости. Одним из таких условий является соблюдение непрерывности искомых функций, а иногда и их первых производных на границах смежных элементов. При этом необходимо отметить, что в задачах прочности оболочечных систем при замене непрерывной краевой задачи на дискретную модель основные ошибки, как известно, связаны с аппроксимацией исходной поверхности, численным интегрированием, ошибками в результате округления чисел при решении больших систем уравнений на ЭВМ. Исследования этой области показывают, что для линейных систем определены теоретические оценки таких ошибок [5]. Сложнее эти проблемы решаются для геометрически и физически нелинейных систем [6]. Практическое использование МКЭ связано с необходимостью разработки и реализации параллельных версий соответствующих вычислительных методов. При этом важным моментом является разработка

способов введения входной информации (задание параметров модели) и представление результатов расчета с учетом наглядности интерфейса пользователя [7, 8]. Необходимо указать, что разработка методов геометрического моделирования конструкций РКТ и критериев исчерпания несущей способности является самостоятельной проблемой с точки зрения практического использования МКЭ [9, 10].

Некоторые объекты исследования и результаты прочностного расчета конструкций РКТ на базе МКЭ-технологий представлены на рис. 1–3.

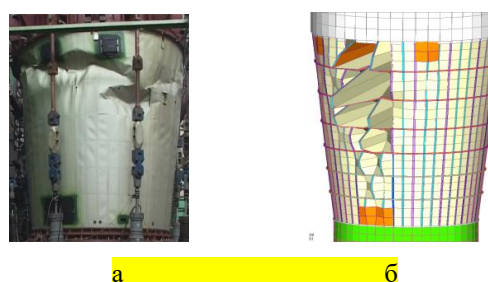


Рис. 1. Экспериментальная (а) и МКЭ (б) формы разрушения переходного отсека

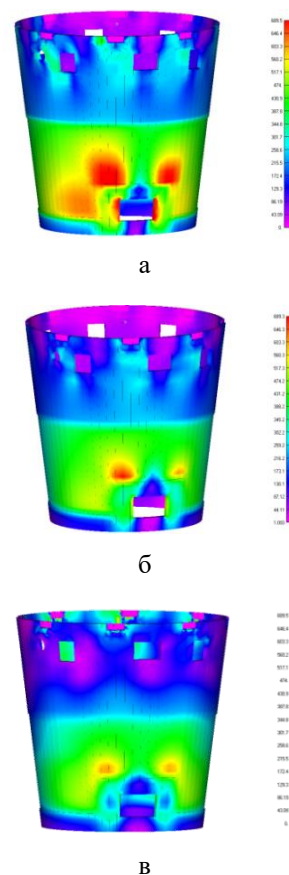


Рис. 2. Распределение максимальных напряжений ($\text{кгм}/\text{см}^2$) в обшивках межступенчатого отсека при испытаниях (а) и МКЭ-расчетах (б, в) (случай «Полет РКН»)

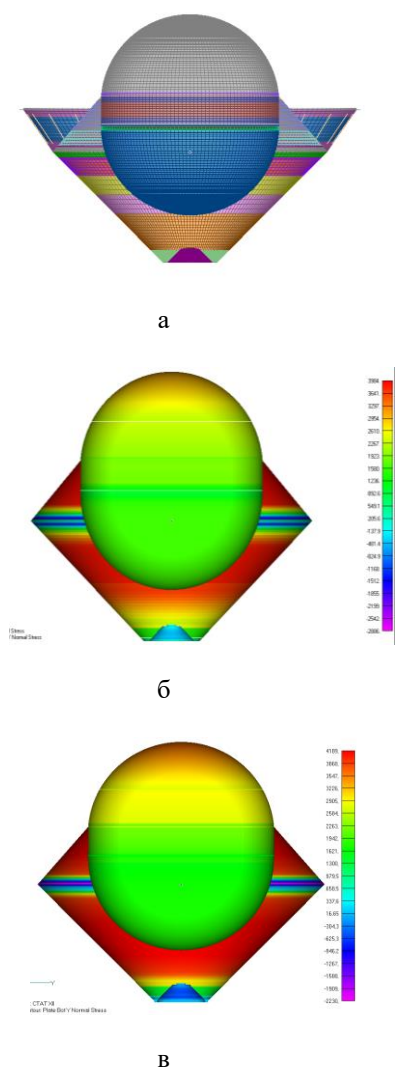


Рис. 3. Конечноэлементная модель топливного бака третьей ступени РН (а) и максимальные расчетные кольцевые напряжения $\sigma_p=4189 \text{ кг/см}^2$ в баке горючего при действии внутреннего давления (б, в)

Общий алгоритм конечноэлементного моделирования поведения конструкции под нагрузкой состоит из трех шагов.

1. Построение дискретной модели и итерационное определение количества узлов и элементов, при котором максимальная интенсивность напряжений при линейном расчете будет изменяться менее чем на 1% относительно предыдущей итерации.

2. Формулировка и построение адаптивной дискретной модели используются как базовая дискретная модель, построенная на первом этапе, со сгущением элементов в областях наибольшего градиента интенсивности напряжений при линейном расчете.

3. Выполнение расчета с учетом физической нелинейности материалов при по-

мощи метода переменных жесткостей на базе полученной на втором этапе дискретной модели.

Возможные перспективы совершенствования программного обеспечения на базе МКЭ-технологий расчета напряженно-деформированного состояния с определением наиболее опасных зон в оболочечных конструкциях РН, на наш взгляд, связываются со следующими основными моментами:

- более точным учетом реальных механических характеристик материалов, непосредственно используемых в конструкции, а не в образцах-свидетелях;

- учетом особенностей геометрии конструкции, особенно в местах стыка, в частности искажения формы сварных оболочек, расположения вваренных фланцев, например для установки датчика уровня, дренажно-предохранительного клапана, гермовыводов от датчиков давления и температуры и др.;

- включением не только физической, но и геометрической нелинейности (порядка 1,5–2 толщины) в математическую модель МКЭ при анализе статической прочности, особенно при использовании в конструкциях высокопрочных сплавов;

- созданием высокой точности координатного соответствия модели и конструкции для оценки несущей способности и механического ресурса изделия;

- возможностью решения ряда задач прочности конструкций с помощью МКЭ, построенных на основе смешанных вариационных принципов (например принципа Рейснера, в соответствии с которым варьируются независимо друг от друга и тензоры напряжений и перемещений). Следует отметить, что основная трудность и искусство при формулировке смешанных и гибридных схем заключается в построении согласованных аппроксимаций для полей перемещений и напряжений;

- разработкой теоретических оценок ошибок аппроксимации, численного интегрирования и округления чисел при решении больших систем уравнений на ЭВМ для физически и геометрически нелинейных систем применительно к конструкциям РКТ.

Приближенный аналитический подход на базе асимптотических методов к проблеме равной устойчивости подкрепленных комбинированных оболочечных отсеков ракетных конструкций

Основная идея аналитического подхода к решению задач равной устойчивости отсеков оболочечной конструкции сложной конфигурации основана на использовании асимптотических методов и их гибридных представлений в сочетании с методом начальных параметров в матричной форме [11–13]. При этом учитывается влияние жесткости промежуточных и торцевых шпангоутов как в плоскости начальной кривизны, так и из ее плоскости.

Ниже приведены результаты анализа устойчивости подкрепленных шпангоутами оболочечных систем типа «цилиндр-конус» и «бочка-оживало» при равномерном внешнем давлении и комбинации усилий, способных вызвать потерю устойчивости (рис. 4–7).

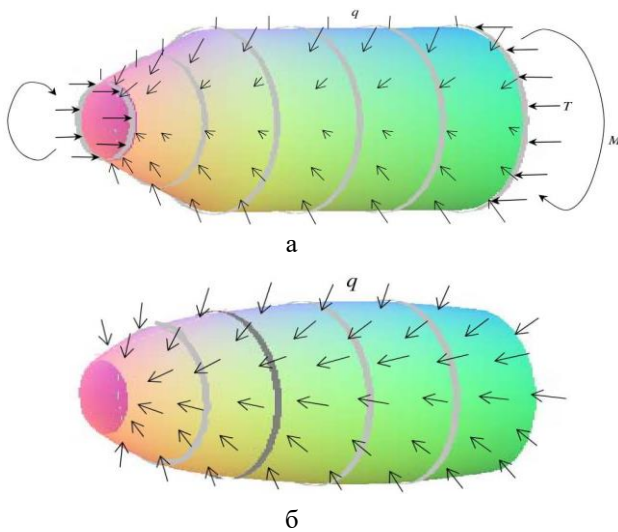


Рис. 4. Схема нагружения оболочечной конструкции:

- а – типа «цилиндр-конус»: осевое сжатие, крутящий момент и внешнее избыточное давление,
- б – типа «бочка-оживало»: внешнее избыточное давление

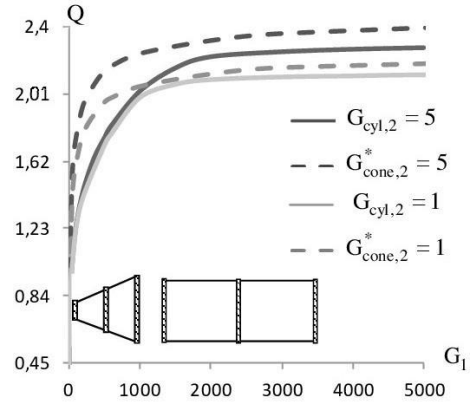


Рис. 5. Зависимость критических усилий внешнего давления Q от жесткостных параметров G_1 шпангоутов для определения параметров равной устойчивости отсеков ($L_{cyl} = 2,5R_{cyl}$)

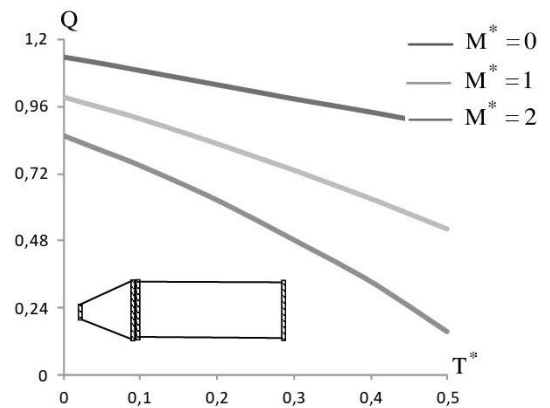


Рис. 6. Влияние осевых сжимающих усилий T^* и кручения Q на величину критического внешнего давления M^* оболочечной конструкции в условиях равной устойчивости отсеков ($L_{cyl} = 2,5R_{cyl}$)

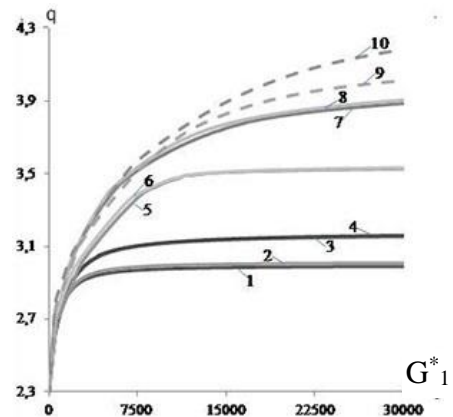


Рис. 7. Влияние жесткости шпангоутов в плоскости начальной кривизны G_1^* на устойчивость q подкрепленной составной конструкции для различных значений жесткости из плоскости G_2^* :

1; 2	3; 4	5; 6	7; 8	9; 10
------	------	------	------	-------

$G_2^* = 0$ (1, 3, 5, 7, 9);
 $G_2^* = 10$ (2, 4, 6, 8, 10)

Приближенный аналитический подход и численный анализ, изложенные выше, могут служить основой для дальнейших исследований в области создания рациональных многослойных неоднородных и анизотропных оболочечных конструкций, подверженных комбинированному внешнему нагружению, и базовой оценкой поведения слоистых оболочечных конструкций сложной конфигурации для использования методов конечных и граничных элементов. Полученные решения могут быть использованы потребителями облачных технологий (cloud computing) [14] для построения гибридных систем анализа.

Направления использования современной стратегии машинного обучения для определения характеристик ракетно-космической техники

В последнее время в нашей стране и за ее пределами интенсивно развиваются и все активнее применяются в различных отраслях науки, техники и образования новые технологии так называемого машинного обучения (Machine Learning Technology). Они включают широкий класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является компьютерное обучение в процессе решения множества подобных задач и изучение методов построения алгоритмов, способных учиться. Основным принцип подобных технологий заключен в том, чтобы написанная программа не просто работала по определенному алгоритму, но и могла самостоятельно выполнять определенные задачи.

Машинное обучение является полем в области информатики, однако оно отличается от традиционных вычислительных подходов. Современные численные алгоритмы представляют собой наборы явно запрограммированных инструкций, используемых компьютерами для выполнения расчетов или решения проблемы. Алгоритмы машинного обучения позволяют компьютерам обучаться на входных данных и использовать статистический анализ для нахождения ими правильных решений. В связи с этим ЭВМ становятся более производительными в построении моделей из выборочных данных, что дает возможность автоматизировать процессы принятия ре-

шений на основе заданной информации. Необходимо отметить, что существующие сервисы не идеальны, как в целом и сами компьютеры, требующие большой вычислительной мощности и специальных ресурсов для параллельной работы программ.

К моделям машинного обучения следует отнести [15] Байесовское обучение (Bayesian Learning); графические генеративные модели (Graphical/generative Models); оптимизацию с помощью выпуклой функции потерь (Convex Loss Optimization); градиентный спуск (Gradient Descent); обучение на базе ядер (Kernel-based learning); бустинг (Boosting); онлайн обучение с экспертами (Online Learning with Experts); упрощение задач машинного обучения (Learning Reductions); приближенно правильное обучение (Probably Approximately Correct (PAC) Learning); теорию статистического обучения (Statistical Learning Theory); обучение на основе дерева решений (Decision tree learning); обучение с подкреплением (reinforcement learning, RL) на основе марковского процесса принятия решений (МППР, Markov decision process, MDP) и на основе частично наблюдаемого марковского процесса принятия решений и др., каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки. Но очень важно, с нашей точки зрения, не допустить в своей практике ситуации, когда абсолютизируется одна из моделей или метод анализа. Лучший способ избежать этого – обучение. Естественно, выбираемая модель машинного обучения должна быть перепроверена практикой. Необходимо подчеркнуть, что в последние годы широкое применение нашла модель машинного обучения, построенная на базе искусственных нейронных сетей с использованием библиотек языка программирования Python [16].

Применять стратегию машинного обучения можно в следующих направлениях:

- быстрая оценка несущей способности элементов конструкций и смежных вопросов при проектировании новых изделий;
- определение «слабых» элементов создаваемых конструкций и систем;
- прогнозирование изменения состояния конструкции (тренда) на основе неразру-

шающих экспериментов;

– анализ большого массива экспериментальных данных;

– очистка экспериментальных данных от шумов (например, от шумов измерений тензорезисторов) и др.

Для дальнейшего практического приложения стратегии машинного обучения необходимо привлечение сверхмощных компьютеров.

Следует упомянуть о весьма актуальной научной проблеме, которая заключается в объяснении внутреннего устройства моделей машинного обучения, требующем дальнейшего обоснования и экспериментального подтверждения в избранном направлении исследования.

В заключение следует подчеркнуть необходимость, с нашей точки зрения, серьезного внимания к данной, безусловно перспективной, научно-образовательной области знаний исследователей и участников проектов, связанных с расчетно-экспериментальными методами определения характеристик ракетно-космической техники.

Выводы

Рассмотрены результаты исследования напряженно-деформированных состояний оболочечных конструкций на основе численных методов анализа, а также аналитических решений. Для предварительной оценки несущей способности силовых конструкций и рационального проектирования целесообразно использовать аналитические решения. На дальнейших этапах отработки конструкций хорошие результаты показывают расчеты с использованием программного обеспечения на основе информационных конечноэлементных технологий, в том числе расчетно-экспериментальные методы с использованием современного машинного обучения (Machine Learning Technology).

Список использованной литературы

1. Жан Жак Руссо. URL: https://www.sdamesse.ru/2019/03/blog-post_14.html
2. Акимов Д. В., Грищак В. З., Гоменюк С. И., Гребенюк С. Н., Лисняк А. А., Чопоров С. В., Ларионов И. Ф., Клименко Д. В., Сиренко В. Н. Математическое моделирование и исследование прочности силовых элементов конструкций космических летательных аппаратов. *Вісн. Запорізького нац. ун-ту. Фіз.-мат. науки.* 2015. № 3. С. 6–13.
3. Akimov D. V., Gristchak V. Z., Gomenjuk S. I., Larionov I. F., Klimenko D. V., Sirenko V. N. Finite-element analysis and experimental investigation on the strength of a three-layered honeycomb sandwich structure of spacecraft adapter module. *Strength of Materials.* 2016. № 3. P. 52–57.
4. Акимов Д. В., Ларионов И. Ф., Клименко Д. В., Грищак В. З., Гоменюк С. И. Математическое моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния отсеков ракет космического назначения. *Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. ГП «КБ «Южное».* Днепр, 2019. Вып. 1. С. 21–27.
5. Яревский Е. А. Теоретические основы методов компьютерного моделирования: учеб.-метод. пособие. Санкт-Петербург, 2010. 83 с.
6. Клованич С. Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье, 2009. 394 с.
7. Акимов Д. В., Грищак В. З., Ларионов И. Ф., Гоменюк С. И., Клименко Д. В., Чопоров С. В., Гребенюк С. Н. Математическое обеспечение анализа прочности силовых элементов ракетно-космической техники. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць.* 2017. Вип. 26. С. 5–21.
8. Акимов Д. В., Грищак В. З., Гоменюк С. И., Ларионов И. Ф., Клименко Д. В., Сиренко В. Н. Экспериментальное исследование деформированного состояния и прочности межступенчатого отсека ракетносителя при статическом внешнем нагружении. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* 2016. №1. С. 82–89.

9. Акимов Д. В., Грищак В. З., Гребенюк С. Н., Гоменюк С. И. Сравнительный анализ методик расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкции ракетносителя. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 2. С. 116–120.
10. Gristchak V. Z., Gomeniuk S. I., Grebeniuk S. N., Larionov I. F., Degtiarenko P. G., Akimov D. V. An Investigation of a Spacecraft's Propellant Tanks Shells Bearing Strength. *Aviation in XXI-st Century. Safety in Aviation and Space Technologies: Proceedings the Sixth world congress*. Kiev, 2014. Vol. 1. P. 1.14.49–1.14.51.
11. Грищак В. З., Маневич А. И. Влияние жесткости шпангоутов на изгиб из плоскости на устойчивость подкрепленной цилиндрической оболочки. *Гидроаэромеханика и теория упругости*. 1972. Вып. 14. С. 121–130.
12. Грищак В. З., Дьяченко Н. М. Определение областей устойчивости конической оболочки при комбинированном нагружении на базе гибридного асимптотического подхода. *Вісн. Запорізького нац. ун-ту. Фіз.-мат. науки*. 2017. №2. С. 32–46. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vznu_mat_2017_2_6
13. Дегтяренко П. Г., Грищак В. З., Грищак Д. Д., Дьяченко Н. М. К проблеме равноустойчивости подкрепленной оболочечной конструкции при комбинированном нагружении. *Космическая наука и технология*. 2019. Т. 25, № 6(121). С. 3–14.
14. Кононюк А. Е. Фундаментальная теория облачных технологий: в 18 кн. Київ, 2018. Кн. 1. 620 с.
15. URL: <http://datareview.info/article/vse-modeli-mashinnogo-obucheniya-imeyut-svoi-nedostatki>
16. Чопорова О. В., Чопоров С. В., Лисняк А. О. Використання машинного навчання для прогнозування напружено-деформованого стану квадратної пластини. Математичне моделювання фізичних і технологічних процесів і технічних систем. *Вісн. ХНТУ*. 2019. № 2(69). С. 192–201.

Статья поступила 20.01.2020