УДК 624.046:530.16
Назаров Д.И., доцент, канд. техн. наук
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева

ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ: БИФУРКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ

CATASTROPHE THEORY: BIFURCATION ANALYSIS CRASHING BUILDING STRUCTURES

Бифуркационные принципы теории катастроф указывают на не учитываемый, в современной теории метода конечных элементов, фактор бифуркации [1-4] при геометрически-нелинейном анализе конструкций, как при проектировании, так и при экспертизе промышленной безопасности. Теорию катастроф, как раздел современной математики, активно развивали и пропагандировали отечественные ученые Арнольд В.И., Гивенталь А.Б., Закалюкин В.М. Элементы теории катастроф, в негомотопной механике развивали Алфутов Н.А., Колесников К.С., однако без практической реализации применительно к конкретным техническим задачам. Практическую ориентацию математической теории катастроф исследуют современные ученые [5-19] в основном на основе простейших математических моделей исследуемых физических явлений

Анализ тестовых задач [4], показывает, что при бифуркации метод конечных элементов, решающий задачи в статической постановке, просто по определению не применим, а бифуркация приводит к разрушению конструкций.

Примером разрушения реальных конструкций построенного здания от бифуркации является авария здания в г. Прокопьевск Кемеровской области (автор работы выступал и как эксперт, так и как проектировщик усиления/восстановления аварийных конструкций). Следует отметить, что исследовались причины аварии несущих конструкций здания произошедшей после года эксплуатации, построенного по проекту специализированной организации, с положительным заключением госэкспертизы, с постоянным техническим контролем строительства, изготовитель конструкций специализированный завод. Особо учитывалось отсутствие превышения нормативных снеговых нагрузок (фактические нагрузки не превышали 50% от нормативных) в период эксплуатации предшествующий аварии (по данным метеорологической станции г. Прокопьевск), а также отсутствие непосредственных динамических воздействий, в т.ч. сейсмического характера.

Аварийная деформация несущих ферм, схема которых представлена на Рис. 1, привела к разрушению элементов ферм, без общего обрушения

крыши здания Рис. 2, особенность которого – хрупкое разрушение элементов Рис. 3 у четырех ферм (т.е. все, кроме торцевых, фермы здания).

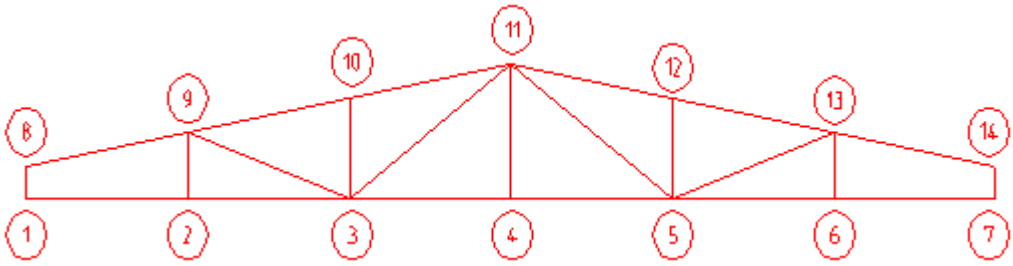

Рис.1. Геометрическая схема разрушившейся фермы

В связи с уникальностью аварии здания, а также с целью исключения иных причин аварии строительных конструкций, было выполнено тщательное инструментальное обследование. Результатом обследования стало выявление почти два десятка дефектов, однако все отмеченные дефекты не являлись причиной хрупкого разрушения элементов фермы.

Рис. 2. Характер обрушения ферм

Несмотря на единственную причину возникновения динамического воздействия – бифуркация элементов конструкции, тщательное обследование и обмеры выполнялись с целью исключения иных причин обрушения конструкций, а также для разработки наиболее оптимального способа усиления конструкций.

По результатам качественного анализа и перерасчета конструкций было выполнено усиление конструкций аварийного здания, данные конструкции эксплуатируются по настоящее время.

Эксперты предлагали эксплуатирующей организации выполнить экспертизу рядом стоящего более крупного здания участниками

строительства которого были те же коллективы, но, ссылаясь, что экспертиза уже проведена и недостатков не обнаружено, заказчик отказал (прим.: через несколько лет здание полностью рухнуло по аналогичной схеме – каскад бифуркаций). Данный случай, вероятно, хоть и трагический, но можно отнести к счастливому стечению обстоятельств, поскольку, если б мы б выявили недостатки аналогичные описываемы, то вряд ли бы смогли доказать заказчику о необходимости финансовых затрат на усиление конструкций полностью соответствующим действующим нормам. В настоящее время отсутствуют как аналитические, так и численные методы расчета энергии удара, приводящего к хрупкому разрушению конструкций. Во многом это связано с фактом наличия негомотопных накладываемых связей, что не позволяет использовать прямые методы решения дифференциальных уравнений. Задача учета бифуркации узлов стержневых конструкций, не просто актуальна, а критична.

Рис. 3. Хрупкое разрушение нижнего пояса фермы

Для анализа хрупкого (динамического) разрушения при статической нагрузке проанализирована конструкция в соответствии с классической теорией катастроф [20] пример конструкции анализа бифуркации коразмерности один представлен на Рис. 4, график реакции расчетной схемы фермы Мизеса, в зависимости от перемещения узла воздействия представлен на Рис. 5.

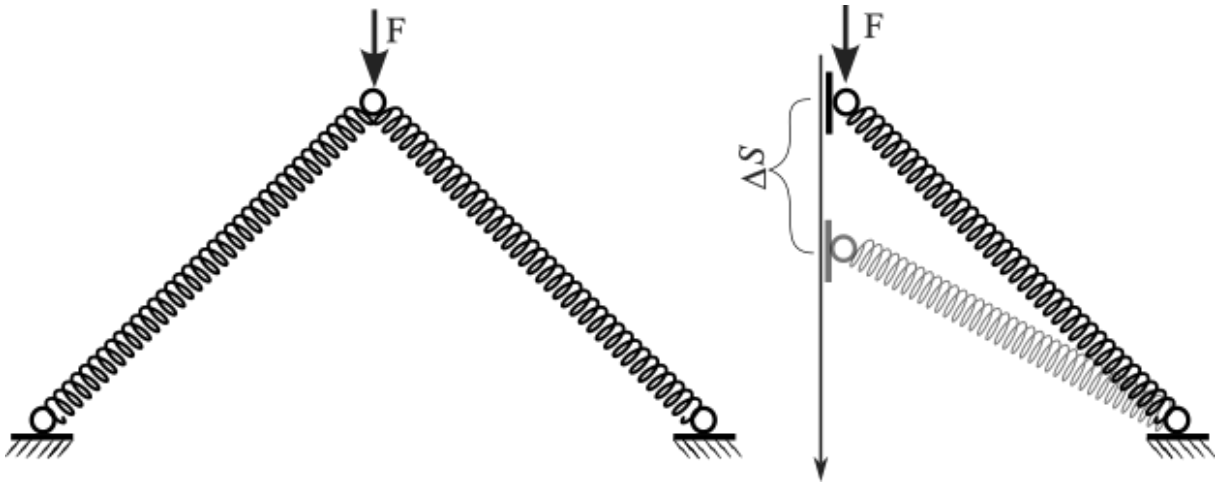

Рис.4 Конструкция анализа бифуркации коразмерности один
а) геометрическая схема фермы Мизеса б) расчетная схема

Моделируя бифуркацию с учетом динамических параметров системы, а именно, для спаренного уголка №10 из стали ВСт3кп, длиной 150 см с отклонением 7 см, получаем критическую силу ≈500 кгс, перемещение до бифуркации – 3,172 см, перемещение узла после бифуркации (точка D на Рис. 7б) соответствующее статической нагрузке ≈4500 кгс. При этом энергия удара при бифуркации ≈100 Дж/см^2, что соответствует ударной вязкости стали ≈100 Дж/см^2.

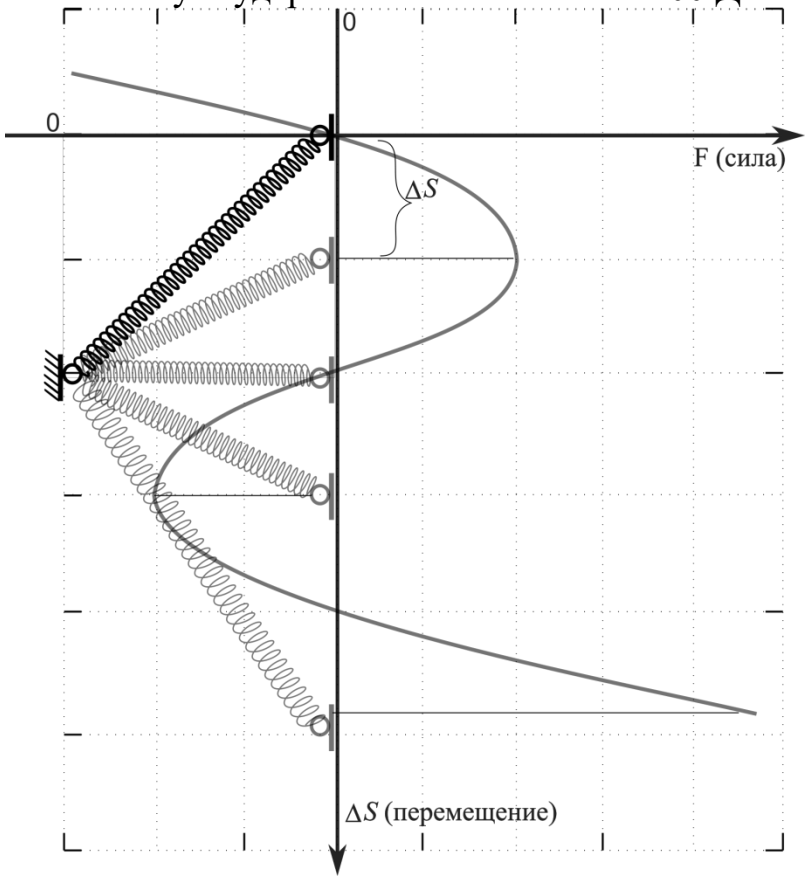

Рис. 5. График реакции опоры фермы Мизеса

Характер изменения энергии внешней силы Ру и энергии деформации представлен графиком на Рис. 6.

Более полный энергетический анализ одноэлементной бифуркации может показать, что точки статического равновесия системы (механика Ньютона), точка минимума энергии системы (механика Чаплыгина) и точка вариации энергии системы (механика Лагранжа) – не совпадают, что косвенном образом свидетельствует о неголономных свойствах рассматриваемой системы.

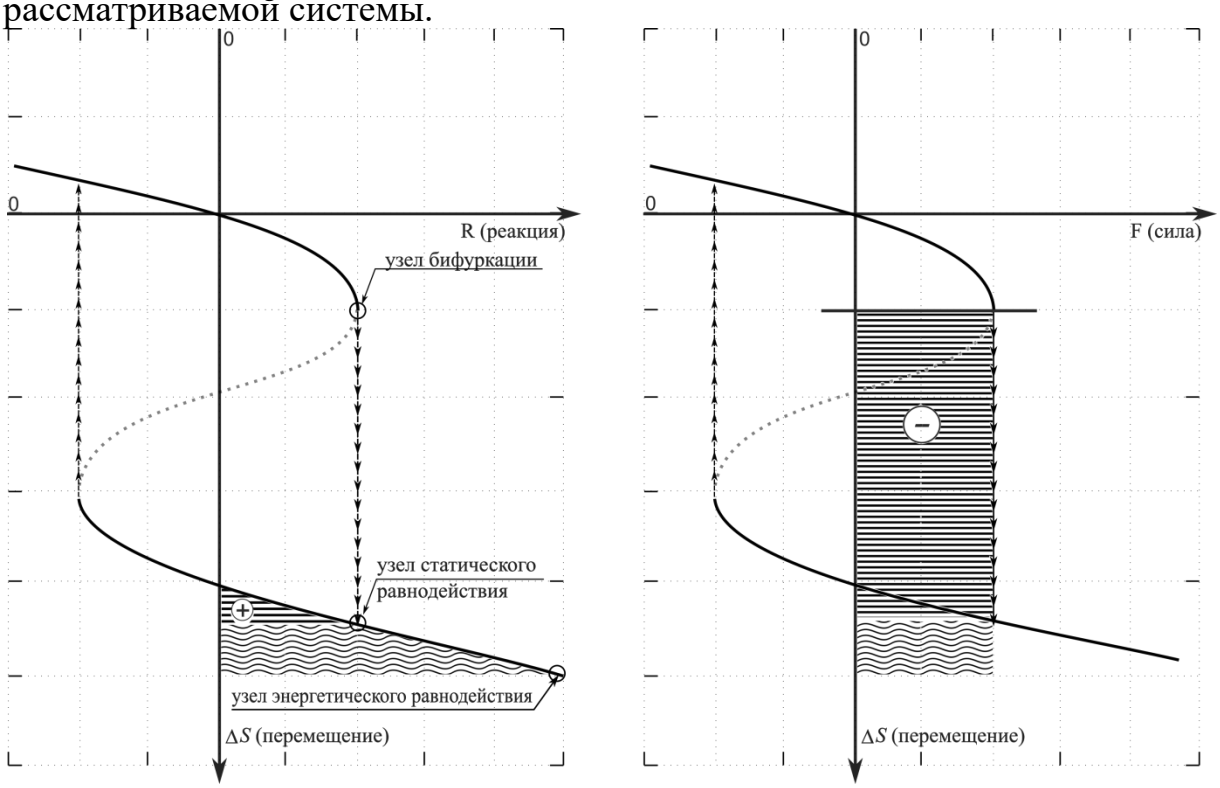

Рис. 6. График изменения энергии внешней силы и энергии деформации

Таким образом задача учета бифуркации узлов стержневых конструкций, не просто актуальна, а критична, поэтому использование теории катастроф применительно к FEM анализу предельного состояния несущих конструкций обеспечит при проектировании горнотехнических зданий и сооружений их промышленную безопасность.

Основной проблемой (как научной задачей) в данном случае является свойство задач геометрически-нелинейного анализа как «задача трёх тел» широко известная в математике и сформулированная более двух веков назад Эйлером и Лагранжем. Для осуществления решения имеющего как математическое, так и физическое обоснование, необходимо чёткое физическое определение и соответствующее математическое описание таких обозначений как: «статическая сила», «статическое нагружение», «потеря устойчивости формы». Без чётких определений невозможно выявить какое из решений правильное, а какое не правильное с точки зрения механики. Корректный геометрически-нелинейного анализ ставит под сомнение многие базовые положения не только метода конечных

элементов, но и такие фундаментальные понятия: вариационный принцип Бетти (о взаимности перемещений), вариационный принцип Максвелла (о взаимности работ), принцип Кастильяно (определение перемещения).

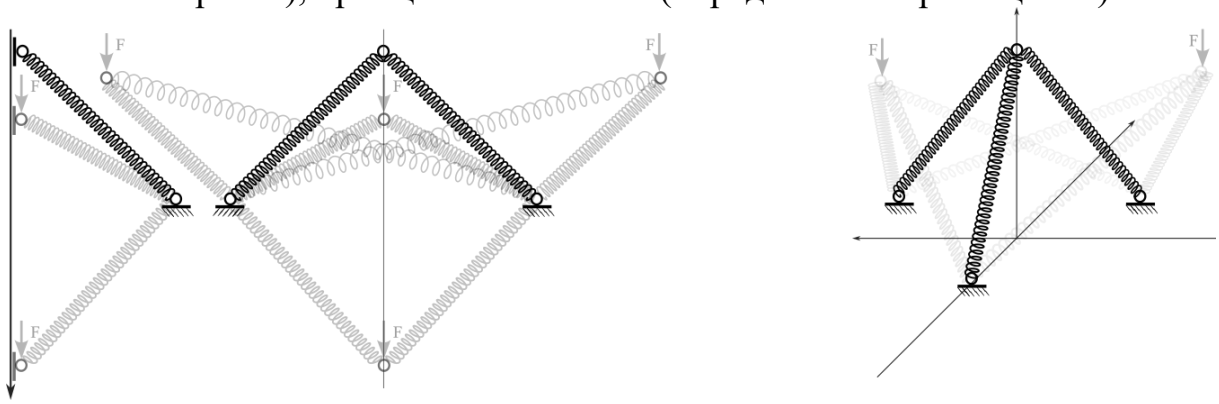

Рис. 7. Пример «Задача трёх тел» применительно к задаче геометрически-нелинейного анализа (1 элемент – 2 решения, 2 – 4, 3 – 8 решений)

Исходя из физических свойств геометрически-нелинейного анализ (на примере анализа График реакции опоры фермы Мизеса, см. Рис. 5.) для равновесных состояний общее количество решений, как решение задачи трёх тел, составляет для «силовых» решений 2^N, для «кинематических» решений 3^N, где N – количество стержней в системе, что указано на Рис. 7 (прим: для трёх стержней показано одно из осесимметричных положений и не показано верхнее и нижнее симметричное положение аналогичное схеме для одного стержня).

В связи с выше изложенным, необходимо указать, что без чёткого физического определения и соответствующего математического описания таких терминов как: «статическая сила», «статическое нагружение», «потеря устойчивости формы», невозможно адекватно описать бифуркации узлов конструкций и создать теорию метода конечных элементов, позволяющую предотвратить аварии конструкций связанных с бифуркацией узлов.

Особо необходимо отметить, что проблема не учитываемых бифуркаций совершенно не описывается анализом устойчивости стержней (buckling analysis), а физическое явление «скачка» совершенно не отражается нелинейным анализом устойчивости стержней, т.е. не отражена как в теоретической, так и в нормативной литературе по определению предельной несущей способности конструкций.

В частности, если нелинейным анализ устойчивости стержней не отражает реального физического явления – скачка, с последующим хрупким разрушением от динамического воздействия, то проблема линейного анализа устойчивости стержней более математическая. В линейном анализе определяется критическая сила. Значение критической силы, почти три века назад, вывел Леонардо Эйлер, из модели силы, при которой возникает возможное равновесное криволинейное состояние в

добавление к существующему линейному. Проблема даже не в том, что это не критерий «необходимого и достаточного условия», а только «необходимое условие», проблем в том, что разработанные в тридцатых годах прошлого столетия методы определения критической силы для систем стержней математически являются поиском собственных значений матрицы жесткости. Критические силы для системы стержней – это точные математические значения для матрицы жесткости, ни каких возможных потерь устойчивости при других значениях быть не может. При этом, если логически обосновано, для одного стержня, при превышении нагружением критической силы заявлять о потери устойчивости, т.к. критическая сила была превышена, то для системы из двух стержней – уже нет. Для понимания, используем приведенные на Рис. 8 схемы потери устойчивости. Так, например, если из анализа двухстержневой конструкции следует, что критические силы 100 и 110 (размерность не указываем), при этом мы ранее определили критические силы по отдельности для стержней, которые составляли 95 и 115, то например, мы абсурдно не можем заявить, что при приложении сил, например 5 и 10000, система потеряет устойчивость, т.к. у нас не возникало (и не могло возникнуть) указанной пары критических сил.

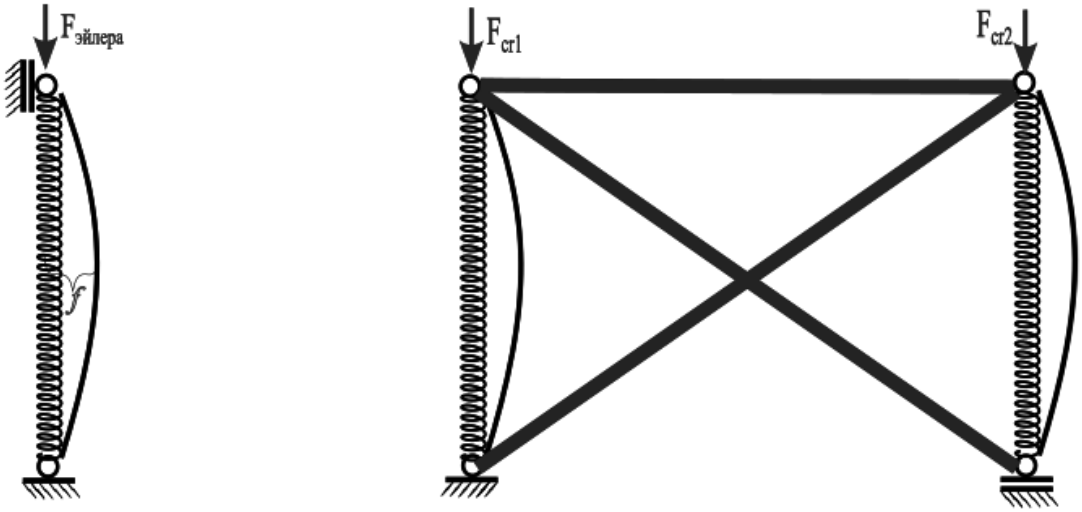

Рис. 8. Пример анализа устойчивости (buckling analysis) одного (эйлерова) стержня и конструкции из двух деформируемых стержней

Множественность возможных реальных решений при геометрически-нелинейном анализе, неопределенность в критических силах при анализе устойчивости систем, отсутствие физического эквивалента прощелкиванию при нелинейном конечно-элементом анализе, требует научного развития физического определения и соответствующего математического описания таких терминов как «статическая сила», «статическое нагружение», «потеря устойчивости формы», для адекватного моделирования аварии конструкций.

Список литературы:

1. Nazarov, D. I. Design and expertising industrial safety mining buildings and structures with the catastrophe theory // Miner's week – 2015: M., 2015. – P. 363-369. – EDN TSDMVV;

2. Першин, В. В., Назаров Д.И. Бифуркационный анализ разрушения конструкций горнотехнического здания // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 4. – С. 124-129. – EDN TUXPTN;

3. Назаров, Д. И. Разрушение конструкций горнотехнического здания, энергетический и бифуркационный анализ // ГИАБ (научно-технический журнал). – 2015. – № 7. – С. 95-100. – EDN UGCBKP;

4. Назаров, Д. И. Теория катастроф в задачах анализа состояния горнотехнических зданий и сооружений / Д. И. Назаров // Вестник КузГТУ. – 2010. – № 2(78). – С. 80-81. – EDN LPBLJR;

5. Dorofeev, N. The location of hidden process in structure of building / N. Dorofeev, A. Grecheneva, E. Pankina // AIP Conference Proceedings : 2, Krasnoyarsk, 29–31 июля 2021 года. – Krasnoyarsk, 2022. – EDN WQGXEQ;

6. Панькина, Е. С. Контроль образования деструктивных процессов в системе геотехнического мониторинга / Е. С. Панькина, Н. В. Дорофеев, А. В. Греченева // Южно-Сибирский научный вестник. – 2021. – № 5(39). – С. 43-50. – DOI 10.25699/SSSB.2021.39.5.001. – EDN LLSMSJ;

7. Dorofeev, N. V. The algorithm for complex processing of heterogeneous data at the local level in an automated geotechnical monitoring system / N. V. Dorofeev, A. V. Grecheneva, E. S. Pankina // CEUR Workshop Proceedings, Barnaul, 21 октября 2021 года. – Barnaul, 2021. – P. 34-45. – EDN ZSIIQV;

8. Ионов, П. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в соединениях гидропривода / П. А. Ионов, А. В. Столяров, А. М. Земсков // СТИН. – 2020. – № 10. – С. 7-10. – EDN KMVBZH;

9. Журавков М. А., Чигарев А. В. Инверсионная неустойчивость, бифуркации, катастрофы в геотехнике и геомеханике и что об этом знали древние египтяне/ Минск: БГУ, 2022.–50 с.: ил.–Библиогр.: с. 46–49. – 2022.;

10. Лепёхина Ю. А. Математические модели применения теории катастроф //Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. – 2022. – С. 399-407;

11. Керус, К. В. Методы и средства моделирования элементов теории катастроф для задач энергетики // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления; Гомель: ГГТУ, 2021. – С. 277-280. – EDN WWAXXV;

12. Анников, Д. Ю. Прикладные вопросы теории катастроф / Д. Ю. Анников, Е. В. Голованова // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК : Материалы Международной студенческой научной конференции, Майский: БелГАУ имени В.Я. Горина, 2022. – С. 206-207. – EDN GLWMIN;

13. Гуц А. К. Моделирование стационарных равновесных состояний почвы и их катастрофические изменения под влиянием антропогенных нагрузок //Математические структуры и моделирование. – 2023. – №. 2 (66). – С. 15-37;

14. Процессы повреждаемости малоэтажных зданий / Ж. Ы. Маматов, Ж. Ш. Кожобаев, С. К. Маматов, Э. Б. Бейшеев // Вестник Международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. – 2022. – № 1(13). – С. 75-83. – DOI 10.38054/iaeee-202207. – EDN DEBCAR;

15. Процесс разрушения и моделирование повреждаемости малоэтажных зданий построенных из местных материалов / А. А. Абдыкалыков, Ж. Ы. Маматов, Ж. Ш. Кожобаев, С. К. Маматов // Вестник Международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству. – 2022. – № 2(14). – С. 5-13. – DOI 10.38054/iaeee-202214. – EDN EEOQVM;

16. Ликсонова Д. И., Медведев А. В. Идентификация многомерных лавинообразных процессов //Universum: технические науки. – 2023. – №. 5-1 (110). – С. 44-49;

17. Мошинский А. И. Механическая система демонстрирующая «Катастрофическое поведение»//Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Mehanika tverdogo tela. – 2023. – №. 4. – С. 83-96;

18. Оморов Р. О. Чувствительность, робастность и грубость динамических систем // Научный журнал Физика. – 2018. – № 1. – С. 15-21. – EDN PDOBWY;

19. Берман А. Ф. Катастрофические отказы сложных механических систем как следствие чувствительности начальных условий // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2022. – № 5. – С. 15-32. — EDN POPPEC;

20. Seydel Rüdiger. Practical bifurcation and stability analysis/ Berlin: Springer, 2010.