



ТЕОРИЯ КАТАСТРОФ В ЗАДАЧАХ ГЕОМЕХАНИКИ И КОНСТРУКЦИЯХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ: ПРАКТИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ (УСИЛЕНИЯ) НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ, РУХНУВШИХ ОТ БИФУРКАЦИИ

Назаров Д.И.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

Аннотация.

За последние десятилетия такие программы конечно-элементного анализа, как Plaxis, Fidesys, Midas, Rocscience – для задач геомеханики, Lira, SCAD-office, SAP2000, ETABS – для расчета крепей и конструкций горнотехнических зданий и сооружений, ANSYS, Nastran, Abaqus – для комплексных научно-исследовательских задач фактически, а не только нормативно-законодательно став практически единственным аппаратом анализа напряженно-деформированного состояния, полностью вытеснили аналитические расчеты. Однако исследование используемой физико-математической теории конечно-элементного анализа и программных реализаций, в т. ч. законодательно допущенных для решения задач геомеханики, расчета крепей и конструкций горнотехнических зданий и сооружений, показывает игнорирование конструкционных бифуркаций. Как аналитически, так и практически (экспериментально) доказано, что бифуркация деформируемых конструкций вызывает необратимые скачкообразные изменения конструктивной схемы и может приводить к хрупкому разрушению и пластическим деформациям. Исследование возможностей физико-математической теории конечно-элементного анализа для определения устойчивости и геометрически-нелинейного (деформированного) состояния показывает невозможность современной реализации корректно определять предельную несущую способность по критерию бифуркации. Невозможность достоверного определения предельной несущей способности в геометрически-нелинейной (деформированной) модели показана примерами и обоснована отсутствием строгого физического определения и соответствующих математических формулировок для таких фундаментальных понятий, как статическая сила, статическое нагружение, устойчивость, несущая способность, без определения которых невозможно создать корректную физико-математическую модель конечно-элементного анализа. Достоверность конечно-элементного анализа – не только актуальная научная проблема, но и требование федерального законодательства в области проектирования особо опасных, технически сложных и уникальных объектов. Учет бифуркации как критерия предельной несущей способности необходим. До создания корректной физико-математической модели конечно-элементного анализа и ее практической реализации аналитическая проверка конструкций по критерию бифуркации обязательна.



Информация о статье

Поступила:
6 октября 2025 г.

Рецензирование:
10 ноября 2025 г.

Принята к печати:
17 ноября 2025 г.

Ключевые слова:

Обрушение, усиление, теория катастроф, бифуркация, несущая способность, устойчивость, метод конечных элементов, механика деформируемого твердого тела, геомеханика, строительная механика

Для цитирования: Назаров Д.И. Теория катастроф в задачах геомеханики и конструкциях горнотехнических сооружений: практика восстановления (усиления) несущих конструкций, рухнувших от бифуркации // Техника и технология горного дела. – 2025. – №4(31). – С. 68-87. – DOI: 10.26730/2618-7434-2025-4-68-87, EDN: IQBNRU



Введение

В вопросах моделирования объектов добычи полезных ископаемых для проектно-конструкторских задач геомеханики [1-7], расчета крепей и проектирования конструкций горнотехнических зданий и сооружений [8-14] с конца девяностых годов аналитические исследования фактически не применяются. Основным инструментом моделирования стали программы конечно-элементного анализа, из множества которых, как отечественных, так и зарубежных, можно выделить наиболее массово используемые отечественными учеными и проектировщиками (прим.: некоторые разработчики и продавцы в рамках односторонних рестрикций прекратили деятельность и, соответственно, поддержку своих программ на отечественном рынке), такие как: специализированные для задач геомеханики – Plaxis, Fidesys, Midas, Rocscience, для задач проектирования горнотехнических зданий и сооружений – Lira, SCAD-Office, SAP2000, ETABS, для комплексных задач – ANSYS, NASTRAN, Abaqus, Comsol.

Аналитические исследования (на основе фундаментальных принципов механики) для практических расчетов фактически не используются, в большей степени не из-за сложностей и значительных требований к фундаментальной подготовке инженера (исследователя), а из-за необходимости использования в обязательном порядке программы конечно-элементного анализа, согласно требованиям федерального законодательства в области проектирования особо опасных, технически сложных и уникальных объектов (см. ст. 16.1. №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», ст. 16. №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»). Соответственно, объекты, относящиеся к особо опасным (все объекты задач геомеханики в угольной и горнорудной промышленности, конструкции: крепей, копров, бункеров и т. д.), принадлежат к повышенному уровню ответственности (см. п. 12.4 и табл. 3 ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения») что требует выполнения указаний законодательства (см. №184-ФЗ «О техническом регулировании»), которые обеспечиваются соблюдением требований специализированных нормативно-технических документов (основные требования см. Постановление Правительства РФ от 5 марта 2007 г. №145 «О порядке организации и проведения государственной экспертизы проектной документации и результатов инженерных изысканий», ФАУ «Главгосэкспертизы России» «Рекомендации по составу и оформлению отчетной документации по результатам расчетов строительных конструкций и оснований зданий и сооружений, представляемых на государственную экспертизу проектной документации», СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*», СП 22.13330.2016 «Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*», СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты. СНиП 2.02.03-85», СП 43.13330.2012 «Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85», СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», СП 91.13330.2012 «Подземные горные выработки. Актуализированная редакция СНиП II-94-80», СП 248.1325800.2016 «Сооружения подземные. Правила проектирования», СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования», СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования», СП 305.1325800.2017 «Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве», СП 385.1325800.2018. «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения», СП 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы», СП 539.1325800.2024 «Научно-техническое сопровождение инженерных изысканий, проектирования и строительства. Общие положения»). При этом обоснованность результатов расчетов программ конечно-элементного анализа (в рамках проектно-конструкторской деятельности) законодательно принимается недостоверной и требует сверки с альтернативным пакетом конечно-элементного анализа, включая экспертное научно-техническое сопровождение как процесса проектирования, так и строительства, вышеуказанные нормативные и законодательные документы требуют:

– выполнения расчета (моделирования задач геомеханики или конструкций горнотехнического объекта) на конечно-элементной программе, допущенной к использованию



(форма исполнения требований к сертификации, верификации, валидации – отдельная тема для дискуссии), по нелинейной модели напряженно-деформированного состояния;

– поверочного расчета на альтернативной программе, допущенной к использованию, иным лицом (т. е. и программа, и проектная организация должны быть не теми, кто делал первоначальный проектный расчет);

– альтернативного расчета на иной МКЭ программе, допущенной к использованию, экспертной организацией в рамках научно-технического сопровождения проектирования и строительства;

– экспертизы расчетов в рамках государственной экспертизы проектной документации;

– мониторинга, в т. ч. геотехнического, соответствия результатов расчетов по проекту и фактического состояния и поведения конструкций экспертной организацией в рамках научно-технического сопровождения инженерных изысканий, проектирования и строительства.

Отношение к достоверности конечно-элементного моделирования на программах, сформированное в большей степени даже не активно развивающим данное направление научным сообществом [15-23], а практикой применения требования законодательных органов, предписывающего при расчете конструкций сооружений в геомеханическом моделировании использование трех разных программ тремя разными коллективами, один из которых экспертного уровня, и дополнительной проверки еще одним коллективом экспертного уровня, что обосновано не сильно афишируемым как среди проектировщиков, так и среди ученых, низким качеством достоверности результатов МКЭ программ, что резко контрастирует с требованиями законодательств в других отраслях, например: финансовая отчетность предприятий и уплата налогов осуществляется в одной программе (обычно – 1С) и никто не требует выполнения контрольных расчетов (более того, надзорные органы, будь то налоговая, или аудиторская проверка, не ставят под сомнение расчет программы, ограничиваясь проверкой исходных данных – документов первичной отчетности), или в медицине: патология, выявленная прибором компьютеризированной функциональной диагностики (узи, томограф, кардиограф и т. д.) не ставится под сомнение, не требует проверки на аналогичном по функционалу приборе с альтернативной программой диагностики (прим.: дополнительные анализы необходимы для постановки диагноза и назначения адекватного комплексного лечения и мониторинга состояния), или проверка достоверности цифровой подписи при осуществлении юридически-значимых действий осуществляется в одной программе (например КриптоПро или сайт Госуслуг) и т. д.

Аналитические модели [24, 25] наряду с выполненными исследованиями [2, 8, 9, 26, 27] анализирующие допущенные для расчетов задач геомеханики и проектирования горнотехнических зданий и сооружений программы конечно-элементного анализа, основанные на современных физико-математических моделях теории конечно-элементного анализа, показывают отсутствие учета бифуркационного поведения конструкций. Моделирование геометрически-нелинейных задач в статической постановке актуального метода конечных элементов неприменимо с достаточной достоверностью [2, 8, 9, 27-29] для практического применения, обеспечивающего безопасность, поскольку бифуркация, приводящая к разрушению конструкций, в современной теории метода конечных элементов не вычисляется адекватно физической модели. Однако выполненные исследования не в полной мере раскрывают проблемность актуального метода конечных элементов и требуют для определения как ключевых проблем, так и основных направлений разработки корректного метода конечных элементов, дополнительного рассмотрения и изучения.

В то же время, если при проектировании как строительства, так и реконструкции или капитального ремонта аналитическое моделирование и анализ неприменимы в силу требований федерального законодательства в области проектирования особо опасных, технически сложных и уникальных объектов (см. ст. 16.1. №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», ст. 16. №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений») и используются только в рамках академических научных исследований, то как при эксплуатации, так и при экспертизе безопасности или устранения аварий, дефектов и недостатков в рамках ремонта или усиления (в силу ст. 15, 16 №384-ФЗ «Технический регламент



о безопасности зданий и сооружений» и ст. 1 №190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации») аналитическое моделирование допустимо. Конкретный пример, представленный в данной статье, показывает, насколько эффективным является аналитическое моделирование предельной несущей способности по критерию бифуркации по сравнению с современным программным конечно-элементным анализом.

Методы исследования.

Бифуркационные принципы теории катастроф указывают на неучитываемый в современной теории метода конечных элементов [24, 25, 27] фактор бифуркации при геометрически-нелинейном анализе конструкций как при проектировании, так и при экспертизе промышленной безопасности эксплуатируемого объекта. Теорию катастроф как раздел современной математики активно развивали и пропагандировали отечественные ученые, такие как академик Арнольд В.И. и его ученики – продолжатели школы: Гивенталь А.Б., Закалюкин В.М. (ссылки на источники см. [8]), теорию катастроф (отдельные ее прикладные элементы) в механике развивали Алфутов Н.А., Колесников К.С., однако без практической реализации применительно к конкретным техническим задачам, т. е. в большей степени как форму прикладной математики. Теоретическое развитие и практическую ориентацию математической теории катастроф развивают современные ученые [30-35], в основном на основе простейших математических моделей исследуемых физических явлений [36-41], геомеханики и геотехники [1-5, 8-11, 14], и социальных вопросах [42]. Необходимо отметить, что до создания нового метода конечных элементов, учитывающего критерий бифуркации, необходимо признание и нормативное принятие аналитического моделирования и анализа предельной несущей способности по критерию бифуркации. При этом если определение предельной несущей способности по критерию бифуркации является важной фундаментальной научной проблемой, то создание нового метода конечных элементов, учитывающего критерий бифуркации, является прикладной проблемой.

Примером разрушения реальных конструкций построенного здания от бифуркации является авария [2, 8, 27] одного из объектов комплекса зданий и сооружений предприятия одного из отечественных крупнейших угольных холдингов. Здание находилось в г. Прокопьевск Кемеровской области. Автор статьи (автор выступал и как эксперт, и как в дальнейшем разработчик конструкции усиления/восстановления аварийных конструкций) был приглашенным специалистом на комиссионное техническое совещание в полном составе руководств и главных специалистов организаций, осуществлявших строительство рухнувшего здания (служба эксплуатации, служба заказчика-застройщика, генподрядная организация, монтажные организации, завод-изготовитель конструкций, проектная организация). В рамках определения плана действий устранения аварии все подрядные организации согласились в рамках гарантийных обязательств выполнить полный демонтаж аварийных и дефектных конструкций и последующий новый монтаж здания из вновь изготовленных по проекту конструкций. Однако данное решение было отвергнуто после того, как автор статьи задал членам комиссии простой вопрос: «Насколько все уверены, что, демонтируя и смонтируя здание заново, мы вновь не столкнемся с авариями?». В результате чего после коротких обсуждений комиссионно, под протокол, было решено выполнить экспертизу (поручив выполнение экспертизы организации автора) состояния здания, существующего после обрушения, на предмет выявления собственно причин обрушения (выявление которых [43-48] необходимо для принятия решений о последующих действиях) и разработки основных решений по устранению аварии и приведению здания к нормативным условиям эксплуатации. Способ усиления [49-57] определяется выявленными причинами аварии.

Следует отметить, что полагалось исследовать и определить причины аварии, произошедшей после года эксплуатации несущих конструкций здания, в строительстве которого принимали участие лучшие организации Кузбасса по проекту достаточно опытной и стабильной проектной организации из Новосибирска (прим.: конкретные юрлица являются конфиденциальной информацией в связи с коммерческой тайной, связанной с возможными и необоснованными репутационными потерями, однако могут быть озвучены в индивидуальном порядке в исключительно научных целях), построенного по проекту специализированной

проектной организацией, с положительным заключением государственной экспертизы проекта, с постоянным техническим контролем строительства специализированной надзорной организацией, изготовлением конструкций специализированным заводом металлоконструкций, монтажом металлоконструкций специализированной монтажной организацией, с общим контролем строительства и выполнением общестроительных работ специализированной генподрядной организацией.

Аварийная деформация несущих ферм привела к разрушению элементов ферм без общего обрушения крыши здания (см. рис. 1), особенность которого, кроме пластических деформаций элементов верхнего пояса и опорных узлов, – хрупкое разрушение элементов (см. рис. 2) у четырех ферм (т. е. всех, кроме торцевых, ферм здания). Особо значимым фактором являлось 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 на обрушившиеся конструкции, в т. ч. сейсмического характера, на все здание.



Рисунок 1 – Общий вид обрушенных несущих ферм покрытия здания
Figure 1 – General view of crashed load-bearing trusses of the building roof

Аварийное здание представляло собой здание производственного назначения, одноэтажное, однопролетное, размером в плане 18×30 м и высотой 8,34 м, построенное в 2009 г. по проекту (шифр 2007-10-8), разработанному специализированной лицензированной проектной организацией. Климатические условия: нормативное ветровое давление – 30 кгс/кв.м. (II район); расчетное значение веса снегового покрова – 240 кгс/кв.м. (IV район); расчетная температура наиболее холодной пятидневки – -39°C ; сейсмический район строительства – 7Б. Наружные стены – из трехслойных панелей, типа «сэндвич». Несущие конструкции покрытия – двускатные металлические фермы, пролетом 18 м. Колонны – стальные. Фундаменты – свайные, с монолитным ростверком. Прогоны по верхним поясам ферм – прокатные стальные профили. Связи по поясам ферм и между колоннами – из гнутых замкнутых стальных квадратных



профилей. Кровля – мягкая из рулонных материалов. Утеплитель покрытия – минераловатные полужесткие плиты.



Рисунок 2 – Хрупкое разрушение нижнего пояса фермы

Figure 2 – Brittle fracture trusses element

При исследовании причин аварии была изучена и тщательно проанализирована вся представленная проектная и исполнительная документация (далее – перечень основной части исследованного комплекта): технический отчет по инженерно-геологическим изысканиям (шифр 69-08), выполненный в 2008 году специализированной лицензированной организацией; рабочий проект (шифр 2007-10-08), выполненный в 2008 году специализированной лицензированной организацией; комплект чертежей КМД (шифр 08/03) смонтированных металлоконструкций; документ о качестве строительных конструкций, выполненный специализированным заводом по изготовлению металлоконструкций, заказ №507; паспорта на сваи; паспорта на поставку бетонной смеси; журнал забивки свай; исполнительная геодезическая съемка свайного поля; акты освидетельствования скрытых работ (на: устройство фундаментов, устройство кровли, монтаж фундаментных балок, устройство пароизоляции, кирпичную кладку цоколя); копии сертификатов материалов (на: прокат периодического профиля № 1712660, 1802386, кровельный материал Унифлекс К/П, стружечные плиты тип: AGEPLAN OSB 3, плиты теплоизоляционные ТЕХНО).

Поскольку автор на момент проведения экспертизы аварии уже более десяти лет активно занимался обоснованием необходимости внедрения бифуркационного анализа в современные пакеты конечно-элементного анализа и в публикациях [2, 8, 9, 24-27] указывал на реальную возможность разрушения конструкций от бифуркации, предварительная причина аварии была аналитически понятна, однако, несмотря на единственную возможную причину – бифуркация элементов конструкции как причина возникновения динамического воздействия, приведшая к хрупкому разрушению, тщательное обследование и обмеры выполнялись с целью исключения иных причин обрушения конструкций, а также для разработки наиболее оптимального способа усиления конструкций.

В связи с уникальностью аварии здания и с целью моделирования всех возможных причин аварии строительных конструкций было выполнено тщательное инструментальное обследование, включая помимо сверки геометрических характеристик смонтированных

элементов конструкций и прочностных характеристик использованных строительных материалов также химический анализ сталей профилей и фасонных элементов обрушившихся ферм. Результатом обследования стало выявление почти двух десятков дефектов по СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений», которые, однако, являлись или уже следствием обрушения ферм, или дефектами монтажа, подлежащими устранению, но не относились к причинам обрушения ферм. Все выявленные дефекты, согласно поверочному конечно-элементному анализу и расчетам согласно действующих норм, не являлись причиной разрушения элементов фермы и совершенно не объясняли хрупкое разрушение элементов нижнего пояса ферм при пластических деформациях элементов верхнего пояса ферм и фасонок.

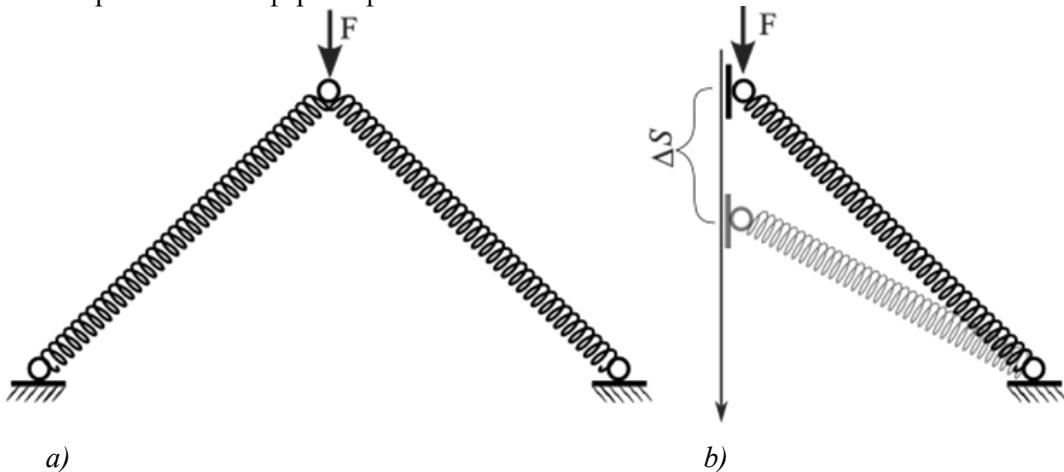


Рисунок 3 – Механическая модель анализа бифуркации: a) ферма Мизеса, b) одноэлементная модель

Figure 3 – Mechanical schematics of bifurcation analysis: a) von Mises truss, b) single element model

Выполненный ранее [14, 16, 19] анализ возможностей метода конечных элементов для определения предельной несущей способности по геометрически-нелинейной (деформированной) форме показал, что основное направление исследований с целью корректного определения предельной несущей способности – по критерию бифуркации как математическому принципу. Невозможность достоверно определять актуальным геометрически-нелинейным конечно-элементным анализом конструкций предельную несущую способность в геометрически-нелинейном (деформированном) состоянии модели, ранее показанная примерами и обоснованная отсутствием строгого физического определения и соответствующих математических формулировок для таких фундаментальных понятий, как статическая сила, статическое нагружение, устойчивость, несущая способность, категорично указывает на необходимость формулирования объективных физических определений этих понятий и строго эквивалентных им математических формулировок, в т. ч. и обратных (необходимо сформулировать физическое явление, которому соответствует математическое определение бифуркации, хорошо изученное в математической теории катастроф).

Механическими моделями, используемыми для экспериментального обоснования математической теории катастроф, являются машина катастроф Зимана (Zeeman catastrophe machine) и ферма Мизеса (von Mises truss). Поведение фермы Мизеса удобнее исследовать как бифуркационную задачу не на двух стержнях (см. рис. 3-а), а на одном (рис. 3-б). Для данной конструкции, состоящей всего из одного стержня с продольной жесткостью EA , проекциями x и y , длиной l , зависимость вертикальной силы (Py) от вертикального перемещения (Δy) определяется уравнением:

$$Py = EA(y - \Delta y) \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + (y - \Delta y)^2}} - \frac{1}{l} \right), \quad (1)$$

график которого с характерными точками бифуркации представлен на рис. 4.

График уравнения (1), моделирования поведения одноэлементной фермы, представленный на рис. 4, изменения энергии внешней силы Pu и энергии деформации показывает, что точка бифуркации и соответствующий ей прыжок согласно математической теории катастроф соответствуют статической постановке задачи, соответствующей абсолютной диссипации «лишней» энергии при бифуркации, однако более фундаментальный закон сохранения энергии требует компенсации потраченной энергии внешней силы энергией деформации стержня, что приводит к положению энергетического равнодействия (см. рис. 5), которое по перемещению значительно более деформированное. Фактически возникает колебательный процесс, приводящий после диссипации энергии (на вязкое или сухое трение) к равнодействию внешней силы воздействия и противодействию реакции деформации в точки статического равновесия. Для расчета реальных конструкций по предельным состояниям критическим является максимальное перемещение. Более полный энергетический анализ (см. [3, 8, 9, 11]) 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 косвенным образом свидетельствует о свойствах рассматриваемой системы как энергетического функционала (здесь функционал определяем как отображение множеств между собой, когда элементу одного множества соответствует более одного элемента другого множества), требующего вариационных принципов исследования.

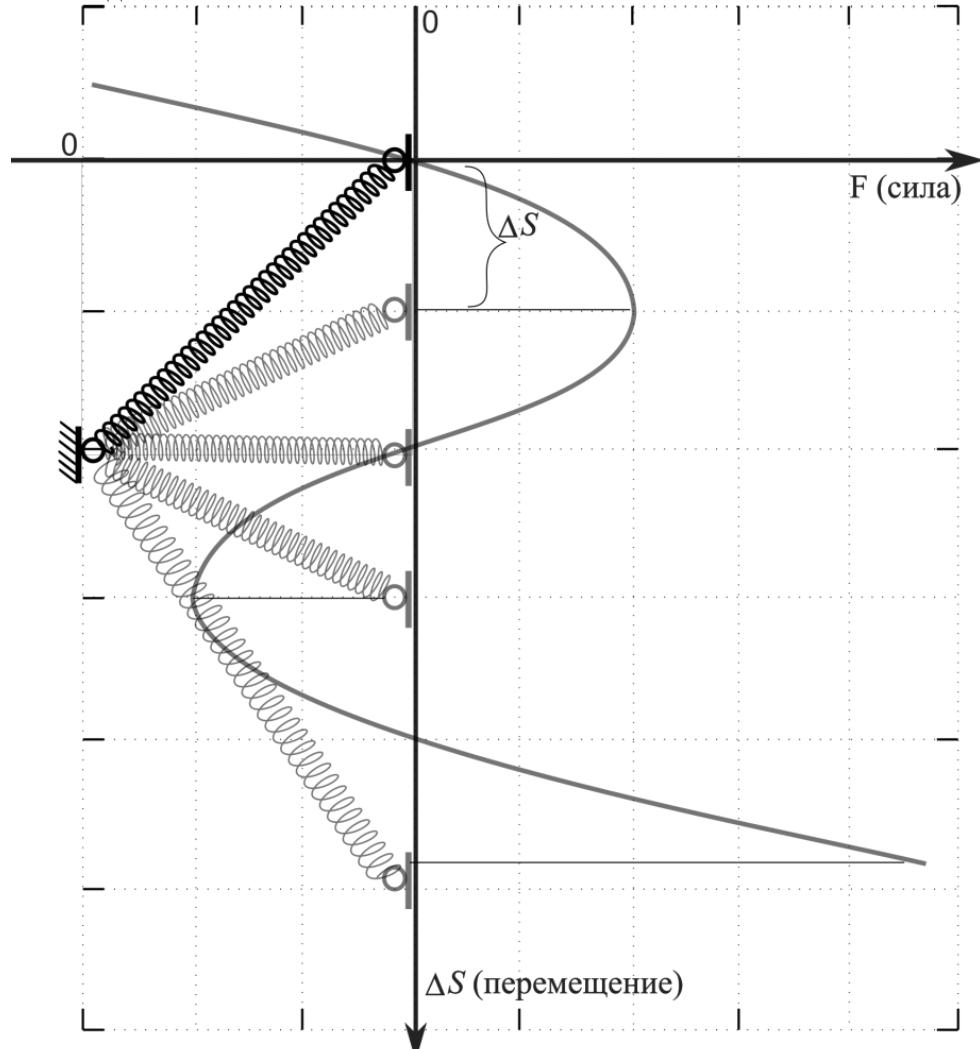


Рисунок 4 – График реакции опоры фермы Мизеса
Figure 4 – von Mises truss support reaction graph

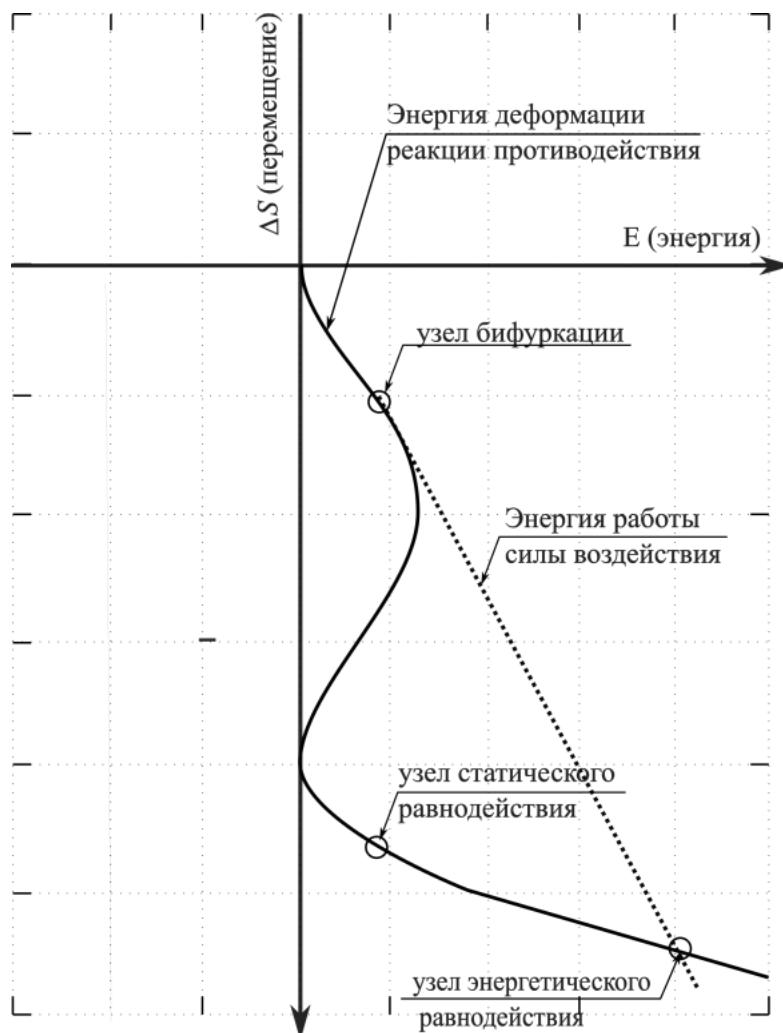


Рисунок 5 – График энергетического анализа бифуркации фермы Мизеса:

Figure 5 – Energy analysis graph of Mises truss bifurcation

Связь точки бифуркации с предельной несущей способностью на основе анализа на хрупкое разрушение исследуется по максимальной деформации. Саму точку бифуркации необходимо классифицировать как предельную точку статического равновесия. В терминологии времен Эйлера, в формулировке Ломоносова об устойчивости кораблей «Тела, плавающего на воде, равновесное положение будет устойчиво, ежели оное тело, будучи несколько наклонено, опять справится, в противном случае положение будет падкое» применительно к современному состоянию механики следует сформулировать это как «Устойчивое состояние статического равновесия – состояние, в котором система при вариационно-возможном отклонении положения от дополнительного воздействия неизменно возвращается в исходное состояние по прекращении воздействия», соответственно, если система не возвращается, то это предел несущей способности (однако критерий подлежит дальнейшему анализу, а именно произошло ли разрушение или изменение структуры системы, приводящей к невозможности ее эксплуатации).

Моделируя бифуркацию с учетом динамических параметров системы, непосредственно исследуя точку бифуркации в анализе хрупкого (динамического) разрушения при статической нагрузке в соответствии с классической теорией катастроф на модели конструкции (рис. 3), анализа бифуркации, представленной на графике реакции расчетной схемы фермы Мизеса (рис. 4), в зависимости от перемещения узла воздействия (рис. 5), непосредственно 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, соответствующее статической нагрузке ≈ 4500 кгс. При этом энергия удара при бифуркации ≈ 100 Дж/см², что соответствует ударной вязкости стали ≈ 100 Дж/см². Данный пример как обоснование реальной причины обрушения рассматриваемых ферм с хрупким (ударным) разрушением нижнего пояса с точки зрения реальной (прикладной) механики и проектирования конструкций) показывает, что точка бифуркации предельного состояния статического равновесия при анализе геометрически-нелинейного поведения несущих конструкций классифицируется по критерию, относящемуся на сегодня к потере устойчивости (потеря устойчивости состояния статического равновесия), а проявлением этого является бифуркация, которая и приводит к хрупкому разрушению (и/или пластическим деформациям).

Вышеприведенным анализом, основанном на математической теории катастроф, выявлена единственно обоснованная и наиболее достоверная причина хрупкого разрушения элементов фермы покрытия (включая прогрессирующее обрушение ферм) – бифуркация узлов конструкций, вызвавшая динамические воздействия, превышающие ударную вязкость стальных элементов конструкции фермы.

Результаты качественного анализа и перерасчета конструкций позволили выполнить чертежи усиления конструкций (см. рис. 6), согласно которым было выполнено усиление конструкций аварийного здания (данные конструкции эксплуатируются и по настоящее время). Необходимо отметить, что усиление (восстановление) аварийных несущих конструкций выполнялось по уникальной технологии, основанной на качественном анализе причин обрушения, а именно без демонтажа ограждающих конструкций здания, что сформировало значительный экономический эффект как по объему строительно-монтажных работ, так и по периоду исключения аварийного здания из производственного цикла предприятия.

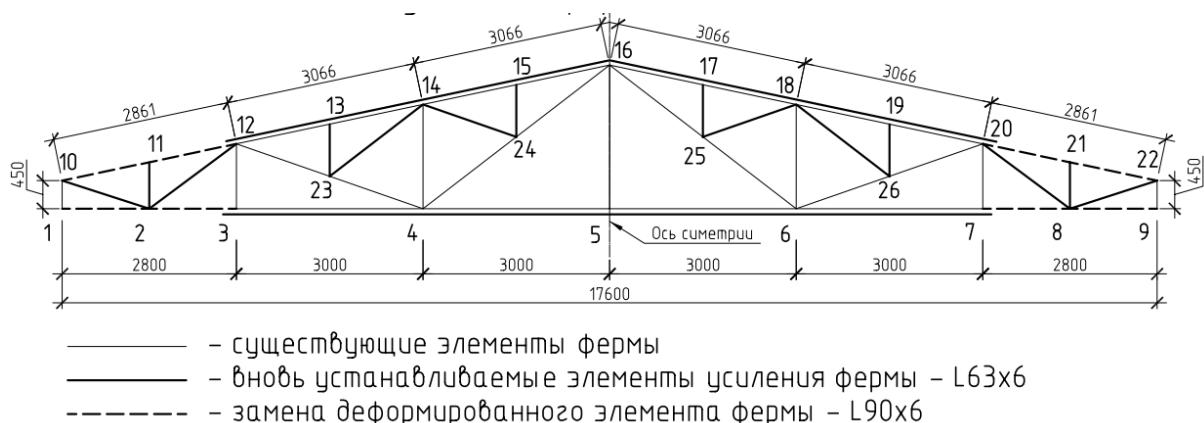


Рисунок 6 – Схема усиления аварийной фермы
Figure 6 – Diagram of emergency truss reinforcement

Усиление производилось установкой шахтной телескопической стойки с последующей срезкой деформированных элементов опорной панели и установкой новых и усиливающих элементов, что позволило в сравнении с демонтажно-монтажным методом значительно сократить как сроки, так и стоимость восстановления аварийного здания. После усиления (рис. 7) здание эксплуатируется по назначению по настоящее время без ограничений.

Поскольку главный производственный корпус был построен тем же составом исполнителей (по проекту тех же проектировщиков, с той же экспертизой проекта, смонтирован теми же строителями из конструкций, изготовленных на том же заводе, под контролем той же организации технического надзора, и тем же генподрядчиком), заказчику было предложено провести экспертизу главного производственного корпуса предприятия на предмет аналогичных недостатков, на что был получен отказ в связи с необоснованностью затрат на дополнительные работы по не имеющему претензий зданию, которое уже было обследовано другой экспертной организацией без замечаний.

a)



б)



Рисунок 7 – Усиленные фермы: a) общий вид, б) вид опорной панели

Figure 7 – Reinforced trusses: a) general view, b) view of the support panel

В январе 2020 (после десяти лет эксплуатации) главный производственный корпус рухнул (по сообщениям очевидцев, по схеме прогрессирующего обрушения, т. е. несущие конструкции крыши рушились последовательно, в рамках математической теории катастроф по схеме каскада бифуркаций), обрушение произошло во время рабочей смены, пострадал один человек (без госпитализации), жертв не было. Назначенная доследственная строительно-техническая экспертиза рухнувшего здания отклонений от действующих норм не выявила, причиной обрушения признаны аномальные климатические условия (прим.: динамическое разрушение конструкций при бифуркации действующие нормы не рассматривают, современные программы конечно-элементного анализа – не учитывают). По прошествии времени можно полагать цинично-благоприятным результатом отказ заказчика в инициированной автором дополнительной экспертизе главного производственного корпуса, поскольку даже при выявлении недостатков, потенциально приводящих к возможной бифуркации, наше экспертное заключение и требование об усилении конструкций было бы отклонено, поскольку оно не обосновано действующими нормами в области безопасности зданий и сооружений.

Результаты исследования

Результаты исследований показывают, что актуальность работ по внедрению прикладных результатов теории катастроф в нормы проектирования обоснована как теоретически, так и на реальных авариях, и для обеспечения безопасности граждан и безаварийности зданий и сооружений требует практической реализации в конечно-элементном анализе. Аналитическое моделирование определения фактора исчерпания несущей способности до обрушения по бифуркационному критерию актуально и необходимо для обеспечения безопасности и



предотвращения аварий, на период до разработки и практического внедрения физической модели и математической реализации достоверного конечно-элементного метода, реализующего геометрически-нелинейную схему деформирования с учетом бифуркационного критерия. Геомеханическое моделирование объектов добычи полезных ископаемых обуславливает разработку методов анализа горного давления, удароопасности, устойчивости, определяемых напряженно-деформированным состоянием массивов горных пород, грунтов, горнотехнических объектов в связи с проведением горных выработок и строительством зданий и сооружений. Теоретические физические принципы геомеханики и математические модели на их основе направлены прежде всего на обеспечение безопасности горных выработок, горнотехнических зданий и сооружений, предотвращения проявления опасных горно-геологических и техногенных явлений как при их строительстве, так и при эксплуатации. Поскольку аналитическое моделирование определения фактора исчерпания несущей способности по бифуркационному критерию – достаточно сложный процесс и требует высокой квалификации как в механике деформированного твердого тела (геомеханики, строительной механики, строительной геотехнологии), так и в специальных разделах аналитической математики, практическая реализация возможна только в комплексных программах конечно-элементного анализа, используемых для практического применения в прикладных задачах. Соответственно, результаты исследований не только имеют высокую научную значимость, но и представляют значительный практический интерес по предотвращению реальных обрушений горнотехнических зданий и сооружений и аварий в задачах геомеханики [2, 3, 8, 9, 11, 24-27].

Выводы

Бифуркационный критерий определяет исчерпание несущей способности по фактору обрушения (внезапное изменение формы конструкции) и является критерием не только потери устойчивого состояния статического равновесия (состояние, в котором система при вариационно-возможном отклонении положения от дополнительного воздействия неизменно возвращается в исходное состояние по прекращении воздействия), но и последующего хрупкого или пластического разрушения элементов конструкции. Разработка достоверного конечно-элементного метода необходима, но невозможна без опоры на классические фундаментальные работы в механике и математическом анализе.

На пути к разработке физическо-математической реализации достоверного конечно-элементного метода, реализующего геометрически-нелинейную схему деформирования с учетом бифуркации узлов, необходимо четко и явно, исключая метафизические определения и абстрактные понятия, сформулировать физическую сущность и соответствующую математическую модель для используемых в механике (и подразделах: механика деформируемого твердого тела, строительная механика, строительная геотехнология, геомеханика и т. д.) базовых понятий и терминов:

- статическая сила (состояние статического равновесия);
- статическое нагружение (в т. ч. жесткое и мягкое нагружение);
- потеря устойчивости (как отдельно элемента, так и системы в целом: формы, состояния);
- бифуркация (как физическое явление в механических системах);
- предельная несущая способность.

Разработка физической модели и математической реализации достоверного конечно-элементного метода, реализующего геометрически-нелинейную схему деформирования с учетом бифуркационного критерия – достаточно важная научная задача, особенно с учетом практической значимости, обеспечивающей в вопросах проектирования горнотехнических зданий и сооружений и задачах геомеханики достоверность результатов, что может предотвратить реальные обрушения горнотехнических зданий и сооружений и опасные геомеханические явления.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



© 2025 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Назаров Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых
e-mail: ndi.spssh@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Список литературы

1. 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.
2. Nazarov D.I. Design and expertising industrial safety mining buildings and structures with the catastrophe theory // Miner's week-2015 : Reports of the XXIII international scientific symposium, Москва, 26–30 января 2015 года. – Москва: НИТУ МИСиС, 2015. – P. 363-369. – EDN TSDMV.
3. Pershin V.V. Safety of mining engineering buildings and facilities under fern analysis and catastrophe theory // Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety : Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control, Qingdao, 17–20 октября 2014 года. Vol. 4. – Qingdao: Atlantis Press, 2014. – P. 428-432. – EDN UGJQYJ.
4. Володченков Ц.Л. Теоретико-катастрофическая модель X1,0 антропогенного воздействия на почву в Калининградской области / Ц. Л. Володченков, А. К. Гуц // Математическое и компьютерное моделирование : сб. мат. XII межд. науч. конф., Омск, 14 марта 2025 года. – Омск: ОГУ им. Ф.М. Достоевского, 2025. – С. 94-96. – EDN VPJFBF.
5. Выявление особенностей деформирования бортов карьеров с использованием физического моделирования / А.А. Павлович, Н.Я. Мельников, А.С. Свириденко, А.М. Шепель // Горный журнал. – 2025. – № 3. – С. 72-79. – DOI 10.17580/gzh.2025.03.10. – EDN KDDZMW.
6. Ермилова В.А. Анализ методик оценки вероятности обрушения горных выработок на шахтах Российской Федерации / В.А. Ермилова, К.В. Тугушов, А.В. Баринов // Актуальные вопросы инженерной защиты населения и территорий : Сб. труд. Всерос. науч.-практ. конф., Химки, 27–28 апреля 2023 года. – С. 78-86. – EDN UMQXPH.
7. Лопатин С.Н. Комплексная оценка устойчивости подземных горных выработок при различных горнотехнических условиях / С.Н. Лопатин, М.А. Журавков, П.С. Передний // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 340-352. – DOI 10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352. – EDN EOBOQMR.
8. Назаров Д.И. Разрушение конструкций горнотехнического здания, энергетический и бифуркационный анализ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 7. – С. 95-100. – EDN UGCBKP.
9. Назаров Д.И. Теория катастроф в задачах анализа горнотехнических сооружений // Строительство и эксплуатация угольных шахт и городских подземных сооружений : материалы VI Российско-китайского симпозиума, Кемерово, 28 сентября 2010 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2010. – С. 117-121. – ISBN 978-5-89070-759-8
10. 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.
11. Першин В.В. Бифуркационный анализ разрушения конструкций горнотехнического здания // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 4. – С. 124-129. – EDN TUXPTN.
12. Предельное состояние деформируемых тел и горных пород / Д.Д. Ивлев, Л.А. Максимова, Р.И. Непершин [и др.]. – Moscow : ООО Издательская фирма "Физико-математическая литература", 2008. – 832 с. – ISBN 978-5-9221-0914-7. – EDN MUWSFR.
13. Современные способы и средства ликвидации последствий аварий на горных предприятиях, связанных с обрушением кровли в подземных выработках и блокированием людей / А.В. Николаев, Ю.М. Говорухин, В.В. Сенкус, Ю.Ю. Тишкова // Безопасная Арктика-2025 : Мат. Межрегион. Науч.-



- практ. сем., Усинск, 31 января 2025 года. – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2025. – С. 46-52. – EDN YGGHQ.
14. Tsypkin, G. G. Bifurcations and Stability of Phase Transition Fronts in Geothermal Reservoirs // Fluid Dynamics. – 2024. – Vol. 59, No. 4. – P. 732-740. – DOI 10.1134/S0015462824603231. – EDN NODLAG.
 15. A new method of failure analysis / S. Alexandrov, M. Rynkovskaya, I. Bajmuratov [et al.] // Vietnam Journal of Science and Technology. – 2024. – Vol. 62, No. 1. – P. 170-183. – DOI 10.15625/2525-2518/18622. – EDN KIYJQJ.
 16. 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.
 17. On Energy Method for Solving the Problem of Stability and Postbuckling Bending of Beams Taking Into Account a Shear and Nonlinearly Elastic Supports / R. A. Kayumov, F. R. Shakiryanov, A. G. Tamrazyan, A. V. Alexeitsev // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2024. – Vol. 45, No. 10. – P. 5055-5068. – DOI 10.1134/S1995080224606003. – EDN RYNUVS.
 18. Peculiarities of calculation and design of smooth orthotropic panels with considering geometric nonlinear behavior / O. Mitrofanov, E. Toroplylina, S. Belyaeva, A. Chulenyov // E3S Web of Conferences : Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk, 25–28 апреля 2023 года. Vol. 389. – Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. – P. 06024. – DOI 10.1051/e3sconf/202338906024. – EDN YICBKE.
 19. Use of computer simulation to establish parameters of steel structure strengthening elements / A. D. Mekhtiyev, Y. Z. H. Sarsikayev, P. A. Kropachev [et al.] // Metalurgija (Zagreb, Croatia). – 2022. – Vol. 61, No. 1. – P. 253-256. – EDN OZURQU.
 20. Михальченко, О.Ю. Адаптивные модели управления строительной системой / О.Ю. Михальченко, А.А. Лапидус, А. А. Ткач // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17, № 1. – EDN AFWPUX.
 21. Муртазалиев, Г. М. Моделирование процесса нелинейного деформирования гибких оболочек / Г. М. Муртазалиев, М. М. Пайзулаев // Актуальные проблемы механики и строительства в современных условиях : сб. науч. тр. – Махачкала, 2025. – С. 262-270. – EDN JKXYRN.
 22. Утебаев, Д. Разностные схемы метода конечных элементов повышенной точности для решения нестационарных уравнений / Д. Утебаев, Г. Х. Утепбергенова, М. М. Казымбетова // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. – 2023. – Т. 221. – С. 115-127. – DOI 10.36535/0233-6723-2023-221-115-127. – EDN SZZRBO.
 23. Харланов, В. Л. Инкрементальные методы решения геометрически нелинейных задач / В. Л. Харланов, С. В. Харланова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2023. – № 5(310). – С. 64-69. – DOI 10.37538/0039-2383.2023.5.64.69. – EDN EAMHYY.
 24. Назаров Д.И. Геометрически нелинейный анализ в методе конечных элементов, реальности и мифы // Проблемы динамики, прочности и износостойкости машин. 2000. № 6.
 25. Назаров Д.И. Современное состояние геометрически нелинейного конечно-элементного анализа конструкций // Информационные и социально-экономические аспекты создания современных технологий. -1999. № 3.
 26. Назаров, Д. И. Архитектура и строительство / Д. И. Назаров, В. Б. Сердобов. – Красноярск: Науч.-инновационный центр, 2011. – 74 с. – ISBN 978-5-904771-44-7. – EDN QJTXSJ.
 27. Назаров, Д. И. Теория катастроф: бифуркационный анализ причин разрушения конструкций здания // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : Сб. мат. XV Междунар. науч.-практ. конф., Кемерово, 21–23 ноября 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 109-1. – EDN KASSLF.
 28. Manuylov, G. A. On Errors When Replacing Non-Bifurcational Stability Problems for Elastic Frames with Bifurcational Ones / G. A. Manuylov, S. B. Kosytsyn, M. M. Begichev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2024. – Vol. 20, No. 1. – P. 116-123. – DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-116-123. – EDN KCJPDR.
 29. Надежность пространственных стержневых металлических конструкций высокого уровня ответственности / В. Ф. Мущанов, А. Н. Оржеховский, А. В. Мущанов, М. Н. Цепляев // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 5. – С. 763-777. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777. – EDN GEAOKH.
 30. Morgulis, A. B. Instability and short waves in a hyperbolic predator-prey system // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2024. – Vol. 65, No. 5. – P. 907-916. – DOI 10.1134/S0021894424050122. – EDN LBOQKJ.
 31. Акманова, С. В. О локальных бифуркациях в нелинейных непрерывно-дискретных динамических системах / С. В. Акманова, М. Г. Юмагулов // Известия высших учебных заведений. Математика. – 2025. – № 2. – С. 3-14. – DOI 10.26907/0021-3446-2025-2-3-14. – EDN GHOFVZ.



32. Барабаш, Н. В. Кусочно-гладкие модели хаотических динамических систем / Н. В. Барабаш, В. Н. Белых // Транспорт. Горизонты развития : Труды 4-го Межд. науч.-пром. форума, 23–26 апреля 2024 года. – Нижний Новгород: ВГУВТ, 2024. – С. 63. – EDN HQZRDD.
33. Кудрявцева, Е. А. Бифуркации в интегрируемых системах с тремя степенями свободы. I / Е. А. Кудрявцева, Л. М. Лерман // Труды Математического института имени В.А. Стеклова. – 2024. – Т. 327. – С. 140-219. – DOI 10.4213/tm4446. – EDN TCGAJC.
34. Мустафина, И. Ж. О безопасных и опасных точках бифуркации в периодических динамических системах // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2024. – № 3(66). – С. 47-54. – DOI 10.17072/1993-0550-2024-3-47-54. – EDN BURDZI.
35. Султанов, О. А. Стохастическая устойчивость модели авторезонанса с бифуркацией типа центр-седло // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2024. – Т. 32, № 2. – С. 147-159. – DOI 10.18500/0869-6632-003090. – EDN VEFWUJ.
36. Анализ экспериментальных исследований фрагментов строительных конструкций на прогрессирующее обрушение / А. В. Недорезов, Н. А. Невгень, Т. И. Загоруйко, Н.А. Севостьянов // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2024. – Том 20, № 1. – С. 33-42. – EDN IAYUPT.
37. Review and Synthesis nf the Main Contour nf the Adaptive Control System for Unstable and Deterministic Chaotic Processes in the "Swallow Tail" Class of Catastrophes / N. Kissikova, A. Adilbayev, S. Akhmetova [et al.] // Труды университета. – 2023. – №. 2(91). – Р. 373-378. – DOI 10.52209/1609-1825_2023_2_373. – EDN AAZAVJ.
38. Басов, В. В. Бифуркации в консервативной системе с тремя точками покоя в невозмущенной части / В. В. Басов, В. С. Горелов // Современные проблемы математики и математического образования : Сб. науч. тр. межд. науч. конф., Санкт-Петербург, 16–18 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург: РГПУ им. А. И. Герцена, 2024. – С. 217-227. – EDN QFCEEE.
39. Киселевич, В. В. Электрическая долговечность полимеров с точки зрения теории катастроф // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2025. – Т. 18, № 2. – С. 93-108. – DOI 10.18721/JPM.18209. – EDN GMOICG.
40. Морозов, Н. Ф. Ветвление форм равновесия кольцевой микропластиинки в электростатическом поле двух электродов / Н. Ф. Морозов, А. В. Лукин, И. А. Попов // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2024. – № 1. – С. 110-132. – DOI 10.31857/S1026351924010063. – EDN WALEPV.
41. Мошинский, А. И. Механическая система, демонстрирующая «катастрофическое поведение» // Известия Академии наук. Механика твердого тела. – 2023. – № 4. – С. 83-96. – DOI 10.31857/S0572329923700034. – EDN JMWCCY.
42. Оморов, Р. О. Метод топологической грубости динамических систем: приложения к исследованиям грубости, бифуркаций и хаоса в синергетических системах // XIV Всеросс. сов. по пробл. управл. : сб. науч. тр., Москва, 17–20 июня 2024 года. – Москва: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. – С. 761-764. – EDN AMUXGM.
43. Абдуллах, Х. Прогрессирующее обрушение: факты, возможные причины, оценка методов анализа по расходу материалов / Х. Абдуллах, В. Н. Алексин, М. В. Плетнев // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 4. – С. 153-158. – DOI 10.22337/2077-9038-2023-4-153-158. – EDN NVCBWH.
44. Богуцкий, Ю. Г. Моделирование несущей системы каркасного здания на базе упругой модели для расчета на прогрессирующее обрушение с учетом реальных физических свойств материалов / Ю. Г. Богуцкий, М. В. Васильев, В. А. Белавский // Строительство и техногенная безопасность. – 2023. – № S1. – С. 148-155. – EDN AHVXRZ.
45. Дюнова, Д. Н. Перспективные технологии и средства мониторинга напряженно-деформационного состояния строительных объектов и конструкций / Д. Н. Дюнова, В. Н. Лымарев // Естественнонаучные и технические аспекты физических явлений в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера : Сборник трудов секции № 21 XXXV Международной научно-практической конференции, Химки, 26 февраля 2025 года. – Химки: Академия гражданской защиты Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2025. – С. 23-28. – EDN BHCKNY.
46. Зенченкова, Д. В. Анализ причин обрушения промышленных зданий и сооружений / Д. В. Зенченкова, А. В. Кокарева // Промышленное и гражданское строительство. Современные тенденции развития строительства : сборник трудов I Всероссийской научно-практической конференции студентов,



- молодых ученых, преподавателей и специалистов строительной отрасли, Санкт-Петербург, 16 ноября 2023 года. – Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2024. – С. 29-33. – EDN APJZAM.
47. Техническая экспертиза: использование математических моделей при расследовании причин падения грузоподъемных механизмов / Л. С. Сабитов, И. Н. Гарькин, И. А. Гарькина, И. К. Киямов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 7. – С. 78-82. – EDN SYBEQJ.
48. Харинский, Н. А. К анализу причин обрушения легких стальных тонкостенных конструкций зданий / Н. А. Харинский, И. С. Казакова // Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием : Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 20–21 апреля 2022 года. Том 75. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2022. – С. 373-376. – EDN JGQMTN.
49. Ванус, Д. С. Комплексное исследование методов усиления железобетонных конструкций / Д. С. Ванус, П. И. Щербакова, И. В. Мельникова // Components of Scientific and Technological Progress. – 2023. – № 5(83). – С. 6-11. – EDN YFYDQE.
50. Васильев, М. В. Моделирование усиления плит покрытия на ПК ЛИРА-САПР / М. В. Васильев, Ю. Г. Богуцкий, В. А. Белавский // Методология безопасности среды жизнедеятельности : сборник научных трудов XVII Международной научно-практической конференции, Симферополь, 14–17 октября 2024 года. – Симферополь: ИТ «Ариал», 2024. – С. 337-341. – EDN ZMDQAT.
51. Иванов, В. А. Расчет усиления стержневой конструкции покрытия / В. А. Иванов, А. Г. Николаева, Н. В. Иванова // Современные вопросы механики сплошных сред - 2023 : сборник статей по материалам IV Международной конференции, Чебоксары, 12 декабря 2023 года. – Чебоксары: ООО «Издательский дом «Среда», 2023. – С. 54-64. – EDN BPNFPS.
52. Коянкин, А. А. Расчет усиливаемых изгибаемых железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели / А. А. Коянкин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2024. – № 1(53). – С. 84-97. – DOI 10.15593/2409-5125/2024.01.06. – EDN UDGZXJ.
53. Оценка несущей способности эксплуатируемого стального каркаса здания при его реконструкции / А. И. Антропкин, А. В. Байдов, А. В. Ивашкин, Н. В. Байдова // Инициативы молодых - науке и производству : Сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 25–26 ноября 2024 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2024. – С. 76-79. – EDN OXOZKZ.
54. Серазутдинов, М. Н. Метод расчета монтажных напряжений в стержневых конструкциях, усиливаемых в деформированном состоянии / М. Н. Серазутдинов, М. Н. Убайдуллоев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2024. – Т. 20, № 3. – С. 197-210. – DOI 10.22363/1815-5235-2024-20-3-197-210. – EDN KSBHBB.
55. Симаков, О. А. Восстановление несущих конструкций зданий после аварий / О. А. Симаков // Железобетонные конструкции. – 2024. – Т. 7, № 3. – С. 34-43. – DOI 10.22227/2949-1622.2024.3.34-43. – EDN NZWSVV.
56. Техническое решение по восстановлению подхода моста после обрушения / Ю. Г. Богуцкий, Д. А. Калафатов, С. В. Родин, В. А. Белавский // Строительство и техногенная безопасность. – 2023. – № S1. – С. 129-139. – EDN WWUOWR.
57. Туснина, О. А. Опыт замены нижнего пояса находящейся под нагрузкой подкраново-подстропильной фермы / О. А. Туснина, В. Ф. Такки, И. Ф. Егоров // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 4. – С. 21-28. – DOI 10.33622/0869-7019.2023.04.21-28. – EDN CFIWGGJ.



CATASTROPHE THEORY IN GEOMECHANICS PROBLEMS AND MINE ENGINEERING STRUCTURES: PRACTICE OF RESTORING (REINFORCING) LOAD-BEARING STRUCTURES THAT HAVE COLLAPSED DUE TO BIFURCATION

Dmitry I. Nazarov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

Abstract.

Over the past decades, finite element analysis programs such as Plaxis, Fidesys, Midas, Rocscience (for geomechanics tasks), Lira, SCAD-office, SAP2000, ETABS (for calculating supports and structures of mining buildings and structures), ANSYS, Nastran, Abaqus for complex research tasks, have effectively, and not only in terms of regulations and legislation, become virtually the only means of analyzing stress-strain states, completely replacing analytical calculations. However, research into the physical and mathematical theory of finite element analysis and software implementations, including those legally approved for solving geomechanical problems and calculating supports and structures of mining buildings and structures, shows that structural bifurcations are being ignored. Both analytically and practically (experimentally), it has been proven that the bifurcation of deformable structures causes irreversible abrupt changes in the structural scheme and can lead to brittle failure and plastic deformation. A study of the capabilities of the physical and mathematical theory of finite element analysis for determining stability and geometrically nonlinear (deformed) states shows that it is impossible to correctly determine the ultimate bearing capacity based on the bifurcation criterion using modern methods. The impossibility of reliably determining the ultimate bearing capacity in a geometrically nonlinear (deformed) model is demonstrated by examples and justified by the absence of a strict physical definition and corresponding mathematical formulations for such fundamental concepts as: static force, static loading, stability, and load-bearing capacity, without which it is impossible to create a correct physical and mathematical model of finite element analysis. The reliability of finite element analysis is not only a pressing scientific issue, but also a requirement of federal legislation in the field of designing particularly dangerous, technically complex, and unique facilities. It is necessary to take bifurcation into account as a criterion for ultimate load-bearing capacity. Until a correct physical and mathematical model of finite element analysis is created and implemented in practice, analytical verification of structures based on the bifurcation criterion is mandatory.



Article info

Received:
06 October 2025

Revised:
10 November 2025

Accepted:
17 November 2025

Keywords: collapse, reinforcement, catastrophe theory, bifurcation, load-bearing capacity, stability, finite element method, mechanics of deformable solids, geomechanics, structural mechanics

For citation Nazarov D.I. Catastrophe theory in geomechanics problems and mine engineering structures: practice of restoring (reinforcing) load-bearing structures that have collapsed due to bifurcation. *Journal of mining and geotechnical engineering*. 2025;4(31):68-87. DOI: 10.26730/2618-7434-2025-4-68-87, EDN: IQBNRU

References

1. Dorofeev N.V., Grecheneva A.V., Pankina E.S. The algorithm for complex processing of heterogeneous data at the local level in an automated geotechnical monitoring system. In: *CEUR Workshop Proceedings*, Barnaul, 21 Oct 2021. – P. 34-45. [In Russ.].



2. Nazarov D.I. Design and expertising industrial safety mining buildings and structures with the catastrophe theory. In: *Miner's week – 2015: Reports of the XXIII International Scientific Symposium*, Moscow, 26-30 Jan 2015. – Moscow, NIST MISIS, 2015. – P. 363-369. [In Russ.].
3. Pershin V.V. Safety of mining engineering buildings and facilities under fern analysis and catastrophe theory In: *Chinese Coal in the XXI Century: Mining, Green and Safety. Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control*. Atlantis Press, 2014. – P. 428-432. DOI: 10.2991/mining-14.2014.64.
4. Volodchenkov C.L., Gutz A.K. Theoretical-catastrophic model X1.0 of anthropogenic impact on soil in the Kaliningrad region. In: *Mathematical and computer modeling*. – Omsk: OSU, 2025. – P. 94-96. [In Russ.].
5. Pavlovich A.A., Melnikov N.Ya., Sviridenko A.S., Shepel A.M. Detection of pitwall deformation features using physical modeling. *Gornyi Zhurnal*. 2025;3:72-79. DOI 10.17580/gzh.2025.03.10. [In Russ.].
6. Ermilova V.A., Tugushov K.V., Barinov A.V. Analysis of methods for assessing the prpbability of collapse of mine workings in the mines of the Russian Federation. In: *Actual issues of engineering protection of population and territories: Procedia*. Himky, 27-28 Apr. 2023. – pp. 78-86. [In Russ.].
7. Lopatin S.N., Zhuravkov M.A., Peredriy P.S. Complex estimation of the underground excavations stability in various mining and geological conditions. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical and technical sciences*. 2024;69(4):340-352. DOI 10.29235/1561-8358-2024-69-4-340-352. [In Russ.].
8. Nazarov D.I. Destruction of the structures of the mining building, energy and bifurcation analysis. *Mining Inf. and Analytical Bulletin (Science and Technical Journal)*. 2015;7:95-100. [In Russ.].
9. Nazarov D.I. Catastrophe Theory in the Analysis of Mining Structures. In: *Construction and Operation of Coal Mines and Underground Structures: Proceedings of the 6th Russian-Chinese Symposium*, Kemerovo, Sep. 28, 2010. – Kemerovo, 2010. – pp. 117-121. – ISBN 978-5-89070-759-8
10. Pankina E.S., Dorofeev N.V., Grecheneva A.V. Control of the formation of destructive precesses in the geotechnical monitoring system. *South Siberian scientific bulletin*. 2021;5(39):43-50. [In Russ.]. DOI 10.25699/SSSB.2021.39.5.001.
11. Pershin, V. V. Bifurcation analysis of mining-technical building construction fracture. *News of universities. Mining magazine*. 2015;4:124-129. [In Russ.].
12. Ivlev D.D., Maksimova L.A., Nepershin R.I. *Limit state of deformable bodies and rocks*. Moscow: Fizmathlit Publishing House, 2008. – 832 pp. – ISBN 978-5-9221-0914-7. [In Russ.].
13. Nikolaev A.V., Govorukhin Yu.M., Senkus Val.V., Tishkova Yu.Yu. Actual approaches and facilities of eliminating the consequences of accidents at mines associated with the entries of roof collapse and blocking personal. In: *Safe Arctic 2025: Interregional. Scientific and Practical Seminar*. Yekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2025. – pp. 46-52. [In Russ.].
14. Tsyplkin, G.G. Bifurcations and Stability of Phase Transition Fronts in Geothermal Reservoirs. *Fluid Dynamics*. 2024;59(4):732-740. DOI 10.1134/S0015462824603231.
15. Alexandrov S., Rynkovskaya M., Bajmuratov I. [et al.] A new method of failure analysis. *Vietnam Journal of Science and Technology*. 2024;62(1):170-183. DOI 10.15625/2525-2518/18622.
16. Dorofeev N., Grecheneva A., Pankina E. The location of hidden process in structure of building. *AIP Conference Proceedings*: 2, Krasnoyarsk, 2022. – EDN WQGXEQ.
17. Kayumov R.A., Shakiryanov F.R., Tamrazyan A.G., Alexeitsev A.V. On energy method for solving the problem of stability and postbuckling bending of beams taking into account a shear and nonlinearly elastic supports. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2024;45(10):5055-5068. DOI 10.1134/S1995080224606003 [In Russ.].
18. Mitrofanov O., Toroplyina E., Belyaeva S., Chulenyov A. Peculiarities of calculation and design of smooth orthotropic panels with considering geometric nonlinear behavior. *E3S Web of Conferences*. 2023;389:06024. DOI 10.1051/e3sconf/202338906024.
19. Mekhtiyev A.D., Sarsikayev Y.Z.H., Kropachev P.A. [et al.] Use of computer simulation to establish parameters of steel structure strengthening elements. *Metalurgija (Zagreb, Croatia)*. 2022;61(1):253-256.
20. Mikhalkchenko O.Yu., Lapidus A.A., Tkach A.A. Adaptive models of construction system management. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(1):29SAVN125 [In Russ.].
21. Murtuzaliev G.M., Paizulaev M.M. Modeling the process of nonlinear deformation of flexible shells. *Current issues of mechanics and construction in modern conditions*, 2025. – pp. 262-270. [In Russ.].
22. Utebaev D., Utepbergenova G.Kh., Kazymbetova M.M. Difference schemes of the finite element method of increased accuracy for solving nonstationary equations. *Journal of Mathematical Sciences*. 2023;221:115-127. DOI 10.36535/0233-6723-2023-221-115-127. [In Russ.].
23. Harlanov V.L., Harlanova S.V. Incremental methods for solving geometrically nonlinear problems. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2023;5:64-69. [In Russ.]. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.5.64.69.



24. Nazarov D.I. Geometrically Nonlinear Analysis in the Finite Element Method: Reality and Myths // *Problems of Dynamics, Strength, and Wear Resistance of Machines*. 2000;6. [In Russ.].
25. Nazarov D.I. The current state of geometrically nonlinear finite element analysis of structures // *Information and socio-economic aspects of creating modern technologies*. 1999;3. [In Russ.].
26. Nazarov D.I., Serdobov V.B. *Architecture and construction*. Krasnoyarsk: Scientific and Innovation Center, 2011. – 74 p. – ISBN 978-5-904771-44-7. [In Russ.].
27. Nazarov D.I. Catastrophe theory: Bifurcation analysis of the causes of building structures crash. In: *Safety of Enterprises in Industrialized Regions: Procedia of XV International Scientific and Practical Conference*. Kemerovo, Nov. 21-23, 2023. Kemerovo: Kuzbass State Technical University, 2023. – P. 109-1. [In Russ.].
28. Manuylov G.A., Kosytsyn S.B., Begichev M.M. On Errors When Replacing Non-Bifurcational Stability Problems for Elastic Frames with Bifurcational Ones. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(1):116-123. DOI 10.22337/2587-9618-2024-20-1-116-123. [In Russ.].
29. Mushchanov V.F., Orzhekhevskiy A.N., Mushchanov A.V., Tseplyaev M.N. Reliability of spatial rod metal structures of high level of responsibility. *Vestnik MGSU*. 2024;19(5):763-777. [In Russ.]. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.5.763-777.
30. Morgulis A. B. Instability and short waves in a hyperbolic predator-prey system // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2024;65(5):907-916. DOI 10.1134/S0021894424050122. [In Russ.].
31. Akmanova S.V., Yumagulov M.G. On local bifurcations in nonlinear continuous-discrete dynamical systems. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Matematika*. 2025;(2):3-14. [In Russ.]. DOI 10.26907/0021-3446-2025-2-3-14.
32. Barabash N.V., Belykh V.N. Piecewise smooth models of chaotic dynamical system. *Transport. Development Horizons*, 2024:63. [In Russ.].
33. Kudryavtseva E.A., Lerman L.M. Bifurcations in Integrable Systems with Three Degrees of Freedom. *Proc. Steklov Inst. Math.* 2024;327:130-207. DOI 10.1134/S0081543824060129. [In Russ.].
34. Mustafina Il. Zh. Safe and Dangerous Bifurcation Points in Non-Autonomous Dynamical Systems. *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*. 2024;(66):47-54. [In Russ.]. DOI 10.17072/1993-0550-2024-3-47-54.
35. Sultanov OA. Stochastic stability of an autoresonance model with a center-saddle bifurcation. *News of Higher Institutions. Applied Nonlinear Dynamics*. 2024;32(2):147-159. DOI 10.18500/0869-6632-003090. [In Russ.].
36. Nedorezov A., Nevgan N., Zagoruiko T., Sevostyanov N. Analysis of experimental studies of fragments of building structures for progressive collapse. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2024;20(1):33-42. [In Russ.].
37. Kissikova N., Adilbayev A., Akhmetova S. [et al.] Review and Synthesis of the Main Contour of the Adaptive Control System for Unstable and Deterministic Chaotic Processes in the "Swallow Tail" Class of Catastrophes. *University Papers*. 2023;2(91):373-378. DOI 10.52209/1609-1825_2023_2_373. [In Russ.].
38. Basov V.V., Gorelov V.S. Bifurcations in a conservative system with three rest points in the unperturbed part / V. V. Basov, V. S. Gorelov // Modern problems of mathematics and mathematical education : SPb, 2024. – P. 217-227. [In Russ.].
39. Kiselevich V.V. An electrical lifetime of polymers in terms of the catastrophe theory. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2025;18(2):93-108. [In Russ.]. DOI 10.18721/JPM.18209.
40. Morozov N.F., Lukin A.V., Popov I.A. Symmetry Breaking and Multistability of Electrostatically Actuated Annular Microplates. *Solid mechanics*. 2024;1:110-132. DOI 10.31857/S1026351924010063. [In Russ.].
41. Moshinskii A.I. A mechanical system exhibiting «catastrophic behavior». *Mechanics of solids*. 2023;4:83-96. [In Russ.]. – DOI 10.31857/S0572329923700034.
42. Omorov R.O. Method of topological roughness of dynamic systems: applications to studies of roughness, bifurcations and chaos in synergetic systems. In: *Procedia of XIV All-Russian Conference on Problems of Control*, Moscow, June 17–20, 2024. Russian Academy of Sciences, 2024. – P. 761-764. [In Russ.].
43. Abdullah H., Alekhin V.N., Pletnev M.V. Progressive Collapse: Facts, Potential Causes, Evaluation of Analysis Methods by Materials Consumption. *Academia. Architecture and Construction*. 2023;4:153-158. – DOI 10.22337/2077-9038-2023-4-153-158. [In Russ.].
44. Bogutskiy U.G., Vasiliev M.V., Belavsky V.A. Modeling of the load-bearing system of a frame building based on an elastic model for calculating progressive collapse, taking into account the real physical properties of materials. *Construction and man-made safety*. 2023;S1:148-155. [In Russ.].
45. Dyunova D.N., Lymarev V.N. Promising technologies and monitoring tools of stress-deformation state construction projects. In: *Natural Sciences and Technical Aspects of Physical Phenomena in Natural and Man-Made Emergencies: Proceedings of 25th International Scientific and Practical Conference*, Khimki,



- February 26, 2025. – Khimki: Civil Defense Academy of EMERCOM of Russia, 2025. – Pp. 23-28. [In Russ.].
46. Zenchenkova D.V., Kokareva A.V. Analysis of the Causes of Collapse of Industrial Buildings and Structures. In: *Industrial and Civil Engineering. Modern Trends in Construction Development: Procedia*. St. Petersburg, Nov. 16, 2023. – pp. 29-33.
47. Sabitov L.S., Garkin I.N., Garkin I.A., Kyamov I.K. Technical expertise: use of mathematical models in investigations of the causes of falling load-lift mechanisms. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2023;7:78-82. [In Russ.].
48. Kharinskiy N.A., Kazakova I.S. Analysis of the causes of collapse of light steel thin-wall structures of buildings. In: *75-th all-Russian scientific and technical conference of students, master's students, and postgraduate students with International participation*. Yaroslavl, Vol. 75. – pp. 373-376. [In Russ.].
49. Vanus D.S., Shcherbakova P.I., Melnikova I.V. A comprehensive study of methods of strengthening of reinforced concrete structures. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2023;5(83):6-11. [In Russ.].
50. Vasilyev M.V., Bogutsky Yu.G., Belavsky V.A. Modeling of Reinforcement of Covering Plates on the LIRA-SAPR PC. In: *Methodology of Life Safety Environment: Collection of Scientific Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference*, Simferopol, October 14–17, 2024. – pp. 337-341. [In Russ.].
51. Ivanov V.A., Nikolaeva A.G., Ivanova N.V. Calculation of reinforcement of the core structure of the coating. In: *Modern Issues of Continuum Mechanics – 2023: Procedia*, Cheboksary, Dec. 12, 2023. – pp. 54-64. [In Russ.].
52. Koiankin A. Calculation of reinforced bending reinforced concrete elements based on a nonlinear deformation model. *PNRPU Bulletin. Applied ecology. Urban development*. 2024;1:84-97. DOI: 10.15593/2409-5125/2024.01.06. [In Russ.].
53. Antropkin A.I. et al. Assessment of the bearing capacity of the exploited steel frame of the building during its reconstruction. In: *Young People's Initiatives for Science and Production: Procedia of VIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students*, Penza, Nov. 25-26, 2024. – pp. 76-79. [In Russ.].
54. Serazutdinov M.N., Ubaydulloev M.N. Method for calculating assembly stresses in frame structures strengthened in deformed state. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(3):197-210. [In Russ.]. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-3-197-210
55. Simakov O.A. Restoration of Load-Bearing Structures of Buildings after Accidents. *Reinforced Concrete Structures (Zhelezobetonnyye Konstruktsii)*. 2024;7(3):34-43. DOI 10.22227/2949-1622.2024.3.34-43. [In Russ.].
56. Bogutskiy U.G., Kalafatov D.A., Rodin S.V., Belavsky V.A. Technical solution for the restoration of the bridge approach after the collapse. *Construction and man-made safety*. 2023;S1:129-139. [In Russ.].
57. Tusnina O.A., Takki V.F., Egorov I.F. Experience of Replacement of the Lower Belt of the Crane-Sub-Truss Under Load. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2023;4:21-28. [In Russ.]. doi:10.33622/0869-7019.2023.04.21-28.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Dmitry I. Nazarov, PhD. (Eng.), Associated Professor of Underground Mining Department
e-mail: ndi.spssh@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
650000, Russian Federation, Kemerovo, 28 Vesennaya St.

