

Д.И. Назаров**РАЗРУШЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ
ГОРНОТЕХНИЧЕСКОГО ЗДАНИЯ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
И БИФУРКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ**

Выполнен анализ хрупкого разрушения несущих строительных конструкций горно-технического здания от статической нагрузки при положительных температурах. Аналитически исследована взаимосвязь геометрически-нелинейного конечно-элементного анализа и теории катастроф при динамическом разрушении конструкций от статического нагружения горнотехнического здания. Показано влияние динамической составляющей при бифуркации узлов несущих строительных конструкций на предельную несущую способность конструкций горнотехнических зданий или сооружений. Выполнено сопоставление энергии динамической составляющей разрушающей нагрузки и кинематической вязкости стали, одинаковый порядок которых указывает на причины хрупкого разрушения при отсутствии внешнего динамического воздействия. Указано на отсутствие корректной математической модели геометрически-нелинейного конечно-элементного метода, позволяющего регистрировать критические нагрузки на горнотехнические здания или сооружения с учетом бифуркации узлов. Бифуркационным анализом обоснована необходимость изучения несущей способности конструкций горнотехнических зданий и сооружений с учетом теории катастроф.

Ключевые слова: горнотехнические здания, несущая способность, метод конечных элементов, геометрически-нелинейный анализ, теория катастроф, бифуркация.

Развитие строительной геотехнологии, как раздела горных наук, связано с научным обоснованием параметров горнотехнических сооружений и разработкой методов их расчета при проектировании и экспертизе промышленной безопасности.

Безопасность горнотехнических сооружений определяют в соответствии с ФЗ-384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», в т.ч. экспертизе несущих конструкций зданий и сооружений предприятий угольной промышленности необходимо руководствоваться СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции (Актуализированная редакция СНиП II-23-81*)». Данным нормативом предписано выполнять расчет конструкций с учетом геометрической нелинейности. Однако не регламентирована необходимость учета бифуркаций в геометрически-нелинейном анализе строительных конструкций.

Примером разрушения конструкций от бифуркации узлов может служить обследование экспертами КузГТУи ООО «Кемеровостройпроект» аварии здания в г. Прокопьевск Кемеровской области. Цель работы заключалась в разработке рекомендаций и рабочей документации по наискорейшему устранению аварийности здания. Однако, данная работа оказалась значимой для науки, в связи с особенностями разрушения конструкций.

Здание производственного назначения, одноэтажное, однопролетное, размером в плане 18×30 м и высотой -8,34 м, построено в 2009 г. При исследовании причин аварии была изучена и тщательно проанализирована проектная и исполнительная документация.



Рис. 1. Общий вид обрушения ферм

Необходимо отметить, что исследовались причины аварии несущих конструкций здания, 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, за период эксплуатации (по данным метеорологической станции г. Прокопьевск), а также отсутствие непосредственных динамических воздействий, в т.ч. сейсмического характера.



Рис. 2. Хрупкое разрушение нижнего пояса фермы

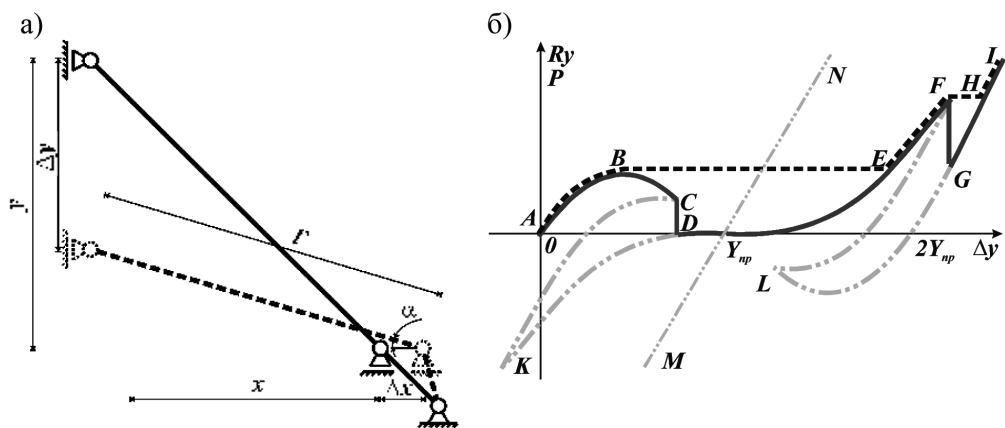


Рис. 3. Анализ деформаций двухэлементной фермы, а) геометрическая схема, б) график деформаций

Без очевидных причин произошла аварийная деформация несущих ферм, разрушение элементов ферм, без общего обрушения крыши здания (рис. 1, 2), особенность которого – хрупкое разрушение крайних элементов нижнего пояса у четырех ферм (т.е. все фермы здания, кроме торцевых).

В связи с неочевидностью причин аварии здания, а также с целью исключения иных факторов аварии строительных конструкций, было выполнено тщательное инструментальное обследование. Результатом обследования стало выявление почти два десятка дефектов согласно СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений», однако все отмеченные дефекты не являлись причиной хрупкого разрушения нижнего пояса фермы.

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.

В ранее выполненных публикациях [1, 2, 3] была сформулирована актуальность учета геометрически-нелинейного анализа строительных конструкций при их проектировании, усилении, или экспертизе промышленной безопасности, а именно значимость не учитываемой в текущем изложении теории метода конечных элементов и, соответственно, всех расчетных программ, такого фактора как «бифуркация». Теорию катастроф, как раздел современной математики, активно развивали и пропагандировали отечественные ученые В.И. Арнольд, А.Б. Гивенталь, В.М. Закалюкин Элементы теории катастроф, в негомтопной механике развивали Н.А. Алфутов, К.С. Колесников, однако без практической реализации применительно к конкретным техническим задачам. Проблемы, указанные А.В. Перельмутом, связанные с «делением на ноль» при прохождении особых точек в конечно-элементном анализе конструкций решались в методе продолжения по параметру как российскими, так и зарубежными учеными. Наиболее простая к анализу схема конструкции приведена на рис. 3, а.

Основа задачи – простейший элемент, конструкция – два элемента, три узла, четыре внешних связи, две степени свободы, материал – линейно упругий, т.е.

$\Delta l = N\Delta l/EA$, где: Δl – удлинение стержня, N – продольная сила (усилие) в стержне, l – длина стержня, EA – продольная жесткость стержня.

Принципиально правильная форма деформации этой конструкции представлена на рис. 3, б, т.е. правый элемент конструкции оказывается повернутым право, а левый повернутым вниз, важно не только конечное положение, но и промежуточные положения.

В случае стержня с продольной жесткостью EA , проекциями x и y , длиной l зависимость вертикальной силы (P_y) от вертикального перемещения (Δy) определяется:

$$P_y = EA \cdot (y - \Delta y) \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + (y - \Delta y)^2}} - \frac{1}{l} \right]. \quad (1)$$

Определим, при каком смещении левого узла (рис. 3, а) достигается критическая горизонтальная сила для правого элемента.

Геометрически длина правого элемента определяется как:

$$l' = \sqrt{(y - \Delta y)^2 + (x + \Delta x)^2}, \quad (2)$$

где Δx – горизонтальное смещение среднего узла, Δy – вертикальное смещение левого узла, в то же время длина левого элемента физически выражается как:

$$l' = l \cdot \left(1 - \frac{N}{EA}\right), \quad (3)$$

где N – продольная сила в левом элементе определяемая как:

$$\frac{R_x}{\cos(\alpha)} = \frac{R_x \cdot \sqrt{(y - \Delta y)^2 + (x + \Delta x)^2}}{(x + \Delta x)}, \quad (4)$$

где R_x – горизонтальная реакция от правого элемента (в нашем случае, при проекциях левого элемента – 10, правого – 1, и соотношении жесткостей 1/10, $R_x = P_{x_{cr}} = 187,4$).

Математические преобразования уравнений (2), (3) и (4) после подстановки численных значений дают значение

$$\Delta y = 6,964,$$

при котором происходит перескок правого элемента вправо.

Длина правого элемента в промежуточном (горизонтальном) положении, используя уравнение (3), при продольной силе определяется:

$$N = R_x = N_r \cdot \cos(\beta) = EA_r \cdot (x' - x - x_r) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{y_{r2}^2 + (x' - x - x_r)^2}} - \frac{1}{l_r} \right), \quad (5)$$

где EA_r – продольная жесткость правого элемента, x_r , y_r , l_r – соответственно горизонтальная проекция, вертикальная проекция и длина правого элемента до деформации, $x' = l'$ – горизонтальная проекция (длина) левого элемента в рассматриваемом положении. График, представленный на рис. 3, б, используем для графического анализа бифуркации узлов (участки В-Е, F-H – бифуркация вертикального перемещения, C-D, F-G – горизонтального перемещения). В процессе бифуркации, представленном на рис. 3, б, происходит исчезновение ста-

тического равновесия, т.е. явление, аналогичное разрушению или потери устойчивости конструкции.

Приведенный выше пример, и тестовые задачи [1], показывают, что при бифуркации метод конечных элементов, решающий задачи в статической постановке, просто по определению не применим, а бифуркация, представленная на рис. 3, приводит не просто к прощелкиванию, а к разрушению конструкций см. рис. 1, 2.

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 негомоторных накладываемых связей, что не позволяет использовать прямые методы решения дифференциальных уравнений. Задача учета бифуркации узлов стержневых конструкций, не просто актуальна, а критична.

Бифуркация, вызванная наличием точки предельного статического равновесия, вызывает динамические воздействия на конструкцию.

Для анализа хрупкого (динамического) разрушения при статической нагрузке рассмотрим конструкцию из половины фермы Мизеса (только правый элемент из конструкции на рис. 3, а). В соответствии с теорией катастроф [4] пример бифуркации коразмерности 1 – складка. Исследование динамического поведения при моделировании с учетом инерционных параметров системы, а именно, для спаренного уголка № 10 из стали ВСтЗкп, длиной 150 см с отклонением 7 см, получаем критическую силу ≈ 500 кгс, перемещение до бифуркации – 3,172 см, перемещение узла после бифуркации (точка максимального удлинения стержня) соответствующее статической нагрузке ≈ 4500 кгс. Оценка динамической энергии проявляемой как удар от бифуркации в ≈ 100 Дж/см² эквивалентна ударной вязкости стали в ≈ 100 Дж/см². График изменения энергии внешней силы P_y и энергии деформации демонстрирующий вышеизложенный анализ, представлен на рис. 4.

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 [5], что косвенным образом свидетельствует о неголономных свойствах рассматриваемой системы.

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

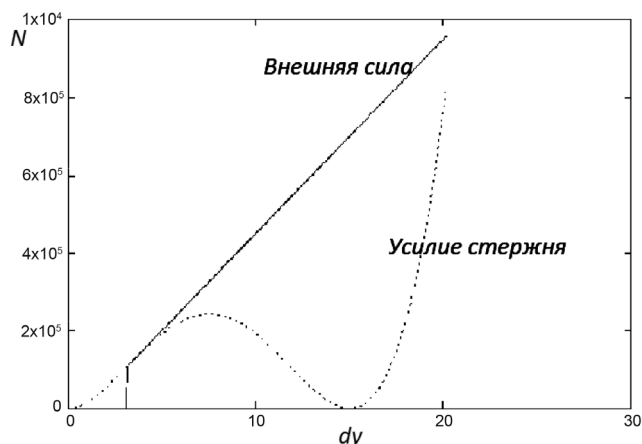


Рис. 4. Зависимость энергии внешней силы внутреннего усилия

1. Назаров Д.И. Некоторые особенности геометрически-нелинейных задач / Автоматизация и информатизация в машиностроении: Сборник трудов I международной научно-технической конференции. – Тула: Тул. гос. ун-т, 2000. – С. 96–99.
2. Назаров Д.И. О «достоверности» расчетов конструкций методом конечных элементов // САПР и графика. – 2000. – № 7. – С. 53–59.
3. Назаров Д.И. Теория катастроф в задачах анализа состояния горнотехнических зданий и сооружений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 80–81.
4. Seydel Rüdiger. Practical bifurcation and stability analysis. – Berlin: Springer, 2010.
5. Pershin V.V., Nazarov D.I. Safety of mining engineering buildings and facilities under FEM analysis and Catastrophe theory / Proceedings of the Taishan Academic Forum – Project on Mine Disaster Prevention and Control. – Atlantis press, Paris, 2014. – P. 428–432. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Назаров Дмитрий Иванович – кандидат технических наук, доцент,
e-mail: DINazarov2007@yandex.ru,
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева.

UDC 622.8:624.94.014.2

**THE CRASH OF STRUCTURES OF MINING ENGINEERING BUILDINGS,
THE ENERGY AND BIFURCATION ANALYSIS**

Nazarov D.I., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: DINazarov2007@yandex.ru,
Kuzbass State Technical University named after T. Gorbachev,
650026, Kemerovo, Russia.

The analysis of uncharacteristic crash truss structures of mining engineering building. The interrelation of the geometrically nonlinear finite element analysis and catastrophe theory in the dynamic fracture of structures from static loading structures of mining engineering building. Shows the effect of the dynamic component at bifurcation nodes on ultimate bearing capacity of structures and buildings held mine technical energy estimation of the dynamic component of the breaking load. Indicated the need to study the carrying capacity of mining structures of buildings and structures, taking into account the catastrophes theory.

Key words: FEM, FEA, geometrically nonlinear FEM analysis, crash fracture, bifurcation of structure joints, catastrophe theory.

REFERENCES

1. Nazarov D.I. Avtomatizatsiya i informatizatsiya v mashinostroyenii. Sbornik trudov I mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii (Automation and computerization in construction: collection of research papers of I International scientific conference), Tula, Tul. gos. un-t, 2000, pp. 96–99.
2. Nazarov D.I. SAPR i grafika. 2000, no 7, pp. 53–59.
3. Nazarov D.I. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010, no 2, pp. 80–81.
4. Seydel Rüdiger. Practical bifurcation and stability analysis. Berlin: Springer, 2010.
5. Pershin V.V., Nazarov D.I. Safety of mining engineering buildings and facilities under FEM analysis and Catastrophe theory. Proceedings of the Taishan Academic Forum Project on Mine Disaster Prevention and Control. Atlantis press, Paris, 2014, pp. 428–432.

