

DOI: 10.38054/iaeee-705

УДК 550.34.012

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Ж.Ы. Маматов<sup>(1)</sup>, И.В. Ненахова<sup>(2)</sup>, Я.И. Рудаев<sup>(3)</sup>,

<sup>(1)</sup>КГУСТА им. Н. Исанова, г. Бишкек, [janybek@mail.ru](mailto:janybek@mail.ru)

<sup>(2)</sup>СПбПУ Петра Великого, Россия

<sup>(3)</sup>КРСУ им. Б. Ельцина, г. Бишкек, [rudaev36@mail.ru](mailto:rudaev36@mail.ru)

**Аннотация.** Рассматривается задача формулировки модели, устанавливающей связь между вероятностными характеристиками сооружений, деформативностью и накоплением несовершенств. В основу предложенной модели положен синергетический подход, в котором условия равновесия исследуется как система, зависящая от поведения параметра управления. Доказательно определена необходимость установления эволюционной связи между повреждаемостью, накопившимися несовершенствами и силовыми воздействиями.

**Ключевые слова:** деформация, разрушение, напряжение, горные породы, неустойчивость, параметры несовершенства и повреждаемости.

## ABOUT DAMAGE MODELING OF CONSTRUCTION FACILITIES

J.Y. Mamatov<sup>(1)</sup>, I.V. Nenahova<sup>(2)</sup>, Ya.I. Rudaev<sup>(3)</sup>,

<sup>(1)</sup>KSUSTA named after N. Isanov, Bishkek city, [janybek@mail.ru](mailto:janybek@mail.ru)

<sup>(2)</sup> St. Petersburg Polytechnic University of the Peter the Great, Russia

<sup>(3)</sup>KRSU named after B. Yeltsin, Bishkek city, [rudaev36@mail.ru](mailto:rudaev36@mail.ru)

**Abstract.** The problem for formulating the models that establishes a connection between the probabilistic characteristics of structures, the deformability and the accumulation of imperfections is considered. The proposed model is based on a synergetic approach, where the equilibrium conditions are investigated as a system that depends on the behavior of control parameter. Evidently, it is necessary to determine the need for an evolutionary connection between damageability, accumulated imperfections and force effects.

**Key words:** deformation, destruction, stress, rocks, instability, parameters of imperfection and damageability.

## КУРУЛУШ ОБЪЕКТИЛЕРИНИН БУЗУЛУУСУН МОДЕЛДӨӨ ТУУРАЛУУ

Ж.Ы. Маматов<sup>(1)</sup>, И.В. Ненахова<sup>(2)</sup>, Я.И. Рудаев<sup>(3)</sup>,

<sup>(1)</sup> Н. Исанов ат. КГУСТА, Бишкек ш., [janybek@mail.ru](mailto:janybek@mail.ru);

<sup>(2)</sup> СПбПУ Петр Великий, Россия;

<sup>(3)</sup> Б. Ельцин ат. КРСУ, Бишкек ш., [rudaev36@mail.ru](mailto:rudaev36@mail.ru)

**Кыскача мазмуну.** Деформациялануунун жана жетилбегендиктин топтолуусунун, курулмалардын ыктымалдуулугунун мүнөздөмөлөрүнүн ортосундагы байланышты

# ВЕСТНИК МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЭКСПЕРТОВ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

*аныктоочу моделин түзүү маселеси каралган. Сунуш кылынган моделдин негизи болуп синергетикалык ыкма киргизилген, теңсалмактуулуктун шарттары бир система катары иликтенип башкаруу параметрдин өгөрүүсүнөн көз каранды болот. Жетилбегендиктин топтоолуусунун, бузулунуунун жана күч-аракеттердин таасиринин ортосундагы эволюциялык байланышты түзүү зарылдыгы далили аныкталган.*

***Негизги сөздөр:** өзгөргүчтүк, талкалануу, чыңалуу, тоо тектери, туруксуздук, бузулунуучулук жана жетилбегендик параметрлери.*

## Введение

Бурный рост городов и их урбанизация связана с возрастанием числа техногенных катастроф, выдвигая на первое место проблему обеспечения конструктивной безопасности строительных объектов в ряд важнейших. Хорошо известно, что постановка и решение задач безопасности сооружений базируется на основе теории предельных состояний. Исследование процессов конструктивной безопасности в традиционной форме можно считать не отвечающим современным вызовам. Отсутствие соответствующих нормативных документов приводит к тому, что разрабатываемые новации можно отнести к за проектными воздействиями [1]. Подобные воздействия часто приводят к неожиданным отказам сооружений, которые обуславливают экономический ущерб и, как правило, гибель людей.

Анализ причины возникновения отказов, следствием которых можно считать прогрессирующие обрушения сооружений, определяют актуальность и практическое приложение постановки задач конструктивной безопасности в более расширенных представлениях, чем при оценке по первой и второй группам предельных состояний.

В продолжение сказанному заметим, что сооружение проектируется так, чтобы были обеспечены определенные рабочие параметры. Однако реальное положение не дает возможности гарантировать полное соответствие возводимого объекта проектируемым характеристикам, понятно, что заранее ничего нельзя сказать о степени нарушения такого соответствия, однако, в определенной мере можно предусмотреть чувствительность конструкции к дефектам как исходного состояния, так и накапливаемым в процессе эксплуатации.

Современная концепция приемлемого риска реальности разрушения строительных объектов при неординарных запроектных воздействиях позволяет привлекать для аналитического моделирования теорию повреждаемости сооружений. Последняя может качественно и количественно оценить неразрушаемость сооружения в течение всего расчетного эксплуатационного промежутка времени, включая внезапные запроектные воздействия.

Таким образом, накопленный уровень знаний в области статики и динамики сооружений позволяет перейти от общих концептуальных положений живучести конструкций к моделированию процессов деформирования и разрушения в рамках

## ВЕСТНИК МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЭКСПЕРТОВ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

методов нелинейной динамики [2-4] с обеспечением не только конструктивной безопасности, но и живучести объектов.

### Постановка задачи

Следуя [5], полагаем, что моделирование реальной нелинейной физико-механической системы динамического типа начинается с введения координат состояния  $\eta_i (i \in \overline{1, k})$ , называемых параметрами порядка. К ним добавляется дополнительное множество параметров  $F_i$ , имитирующих отклик на изменение параметров  $\eta_i$ , и представляющих собой внешние воздействия. Кроме того, предполагается наличие параметров  $\beta_i$ , ответственных за дефекты (несовершенства) исходного состояния системы и развивающиеся в процессе ее эксплуатации.

В соответствие сказанному рассмотрим задачу моделирования несущей способности строительного объекта, которая ассоциируется с нелинейной динамической физико-механической системой.

Текущее состояние системы представляем в виде диссипативной среды, которой соответствует потенциальной функцией вида:

$$\Phi = \Phi(F, \eta, \beta)$$

(2.1)

где, как принято выше,  $F, \eta$  – силовой и деформационно-временной факторы,  $\beta$  параметр несовершенства.

Далее полагаем, что в процессе эксплуатации сооружение проходит ряд состояний, заметное изменение которых осуществляется путем смены диссипативных структур с появлением структур более высокого порядка и сложности. Подобный подход был использован при моделировании деформационного поведения горных пород и бетона с учетом запредельной ветви [5-7].

При таком подходе вполне реально отождествлять деформационное поведение объекта с необратимыми процессами, завершающимися исчерпанием несущей способности.

Возводимые сооружения можно рассматривать как структурно-неоднородные объекты, которые в соответствие с классификацией пространственно-временных диссипативных структур [8] могут считаться локализованными пространственными образованиями, устойчиво существующими в диссипативных неравновесных средах. Именно поэтому, как уже отмечалось выше, процесс снижения несущей способности можно рассматривать как иерархию переходов из одного устойчивого состояния в новое, совершаемое в критических точках.

## ВЕСТНИК МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЭКСПЕРТОВ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

По существу, в процессе эксплуатации в объектах возникают синергетические эффекты [3, 9], причем при медленном характере внешнего воздействия их можно отнести к самоорганизации через управляющие параметры. Приведенные рассуждения свидетельствуют о полезности привлечения при детерминированном моделировании методов математической теории катастроф [10].

### Динамическая модель

При формулировке модели градацию процесса эксплуатации будем рассматривать как дискретную Марковскую процедуру [11], в соответствие которой последующие воздействия обусловлены лишь предыдущими событиями и не зависят от предшествующей истории нарушения.

Другими словами, потенциальную функцию (2.1) представим, как суперпозицию потенциала  $\Phi_p(F, \eta)$ , ответственного за предшествующие состояния, и возмущения  $S(F, \eta, \beta)$ , учитывающего накопившиеся повреждения (несовершенства) текущего состояния имеем, в форме

$$\Phi(F, \eta, \beta) = \Phi_p(F, \eta) + S(\eta, \beta). \quad (3.1)$$

Потенциальную функцию  $\Phi_p(F, \eta)$  можно считать отвечающей некоторой на данный момент совершенной системе, для которой вблизи состояния равновесия возможно разложение в ряд Тейлора вида:

$$\Phi_p(F, \eta) = \Phi_0 + \Phi_{1\eta} + \frac{1}{2}\Phi_2\eta^2 + \frac{1}{3!}\Phi_3\eta^3 + \dots \quad (3.2)$$

В общем случае выбор параметра порядка  $\eta$  осуществляется так, чтобы совершенная система имела состояние равновесия при  $\eta=0$ . Тогда должно иметь место равенство

$$\frac{d\Phi_p(F, \eta)}{d\eta} = \Phi_1 + \Phi_2\eta + \frac{1}{2}\Phi_3\eta^2 + \dots = 0 \quad (3.3)$$

Таким образом, приходим к условию  $\Phi_0 = \Phi_1 = 0$ .

Если предположить, что нагрузка  $F$  приближается к расчетной ( $F \rightarrow F_c$ ), то потенциальная функция  $\Phi = \Phi(F, \eta)$  запишется в виде

$$\Phi_p(F, \eta) = \frac{1}{2}(F_c - F)\eta^2 + \frac{1}{3}\eta^3 + \dots \quad (3.3)$$

В выражении (3.3) произведена смена масштабов по осям  $F$  и  $\eta$ .

Далее считаем, что слагаемыми четвертой и более высоких степеней можно пренебречь.

ВЕСТНИК МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЭКСПЕРТОВ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ  
СТРОИТЕЛЬСТВУ

Критические точки, соответствующие (3.3) определяются обычным способом их соотношения

$$\frac{d\Phi_p}{d\eta} = \eta[(F_c - F) + \eta] = 0. \quad (3.4)$$

Решение уравнения (3.4) дает два корня

$$\eta_1 = 0; \quad \eta_2 = F - F_c \quad (3.5)$$

Отсюда следует, что для совершенной системы смена состояний происходит в момент, когда критические точки  $\eta_1$  и  $\eta_2$  проходят одна через другую.

Возмущение  $S(\eta, \beta)$  представим в виде морсовского разложения [10]. Имеем

$$S(\eta, \beta) = \beta_1 \eta + \frac{1}{2} \beta_2 \eta^2 + \frac{1}{3} \beta_3 \eta^3 + \dots \quad (3.6)$$

Формула (3.6), как ясно из [10], может быть представлена в канонической форме [2] посредством соответствующей нелинейной замены. Такая замена возможна математически, но с физической точки зрения она приведет к сложной нелинейной связи между силовой составляющей  $F$  и параметрами несовершенства  $\beta_1$ . Поэтому, следуя [10], отбросим в (3.6) все члены, кроме линейного.

Тогда потенциальная функция  $\Phi(F, \eta, \beta)$  (3.1), моделирующая несовершенную систему, запишется так

$$\Phi(F, \eta, \beta) = \beta_1 \eta + \frac{1}{2} (F_c - F) \eta^2 + \frac{1}{3} \eta^3. \quad (3.7)$$

Критические точки отвечают равновесному состоянию и определяются условием

$$\frac{d\Phi}{d\eta} = \beta_1 + (F_c - F) \eta + \eta^2 = 0. \quad (3.8)$$

Уравнение (3.8) с точки зрения теории катастроф можно рассматривать как двумерное многообразие, заключенное в пространство  $|R|^3$  с координатными осями  $\eta, F, \beta_1$ . Состояния равновесия будут найдены для каждого  $\beta_1 = const$ .

Отметим, что поведение несовершенной системы зависит от знака параметра несовершенства  $\beta = \beta_1$ . Из решения уравнения (3.8)

$$\eta_{1,2} = -\frac{F_c - F}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{F_c - F}{2}\right)^2 - \beta} \quad (3.9)$$

видно, что при  $\beta < 0$  существуют две критические точки, а при  $\beta > 0$  имеется область, в которой функция (3.7) вообще не имеет критических точек. Последнее имеет место при выполнении условия

$$\left(\frac{F_c - F}{2}\right)^2 - \beta < 0. \quad (3.10)$$

### Обсуждение результатов

1. Условие  $\beta \leq 0$  означает существование локально устойчивого равновесия при всех значениях внешнего воздействия и, следовательно, приводит к установлению некоторого критерия, характеризующего безопасность эксплуатации строительного объекта. Например, система предполагается безопасной, если при критическом нагружении  $F_c$  переменные состояния (параметр порядка) превышают некоторое предписанное безопасное значение  $k : |\eta| > k$ .

2. При  $\beta = \beta_1 > 0$  необходимость в подобной оценке отпадает, поскольку при  $F = F_c$  устойчивое состояние равновесия перестает существовать. Здесь становится понятным, что чувствительность к накапливаемым несовершенствам слабо зависит от параметров  $\beta_1, \beta_2, \dots$ , а сильно – от  $\beta_1 = \beta$ . Поэтому принятое выше решение исключить все возмущения, кроме линейного (3.7), можно считать объективным.

3. Для несовершенных объектов, описываемым потенциальной функцией (3.7), при достижении внешних воздействий критического показателя  $F_c$  естественно предположить появление динамических флуктуаций, существенно снижающих несущую способность. Например, сейсмический фактор может привести при  $F = F_c$  к переходу системы через потенциальный барьер. По существу динамические воздействия могут привести устойчивый случай  $\beta < 0$  к потере устойчивости. Эти переходы из устойчивого состояния в неустойчивое при динамических воздействиях сопровождаются возникновением запроектных решений [1] в форме появления «странных аттракторов» [12]. Последнее требует отдельного рассмотрения.

### О взаимосвязи несовершенства и повреждаемости

При постановке задачи исследования деформационного поведения строительного объекта было введено предположение об иерархичности состояний его в форме смены типа устойчивости. Наиболее чувствительной составляющей потенциальной функции (3.7) к возможным флуктуирующим воздействиям можно считать параметр несовершенства  $\beta$ . Поскольку рассматриваемый подход для моделирования

## ВЕСТНИК МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЭКСПЕРТОВ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

необратимых процессов, сопровождающим эксплуатацию сооружений, относятся к синергетическому, то решающее значение придается процессу управления указанным параметром. Вполне совершенно, что на параметр несовершенства  $\beta$  можно считать вероятностной характеристикой.

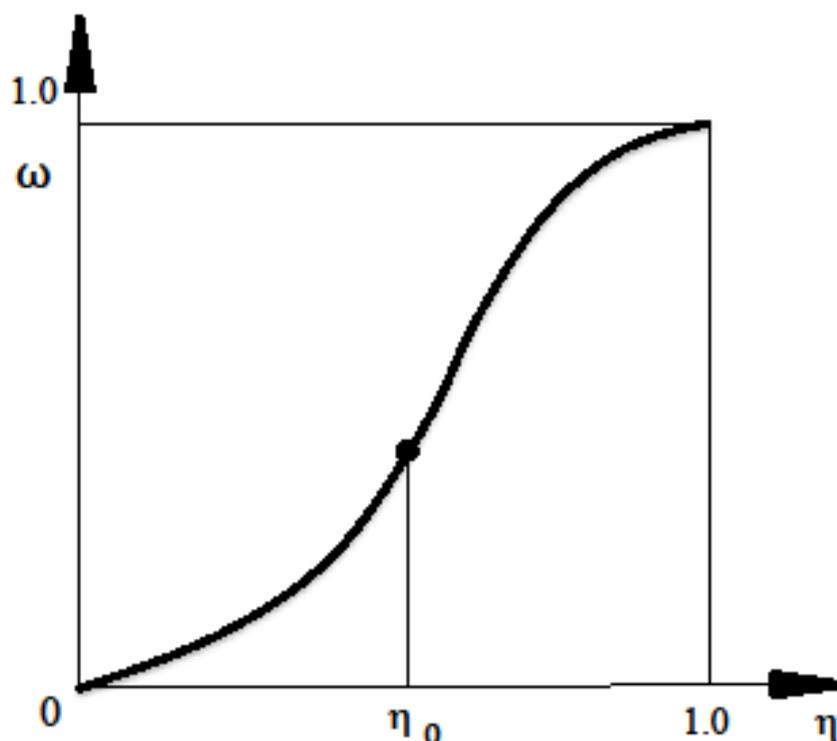
С другой стороны, за последние тридцатилетие получила значительное развитие механика разрушения, основанная на концепции накопления повреждений [13, 14]. Интегральная характеристика процесса накопления повреждений названа параметром повреждаемости.

Отметим, что пионерским здесь следует считать исследование [13], в котором впервые была введена мера повреждаемости (скалярная функция  $\psi$ ). Предполагалось, что функция  $\psi$  принимает нулевое значение при разрушении и равняется единице при полном отсутствии  $\psi$  несовершенств. В [14] предложен параметр  $\omega$ , определяемый через функции  $\psi$  зависимости

$$\omega = 1 - \psi \quad (5.1)$$

Параметр  $\omega$ , назван параметром повреждаемости и оказался более востребованным, чем параметр сплошности  $\psi$ .

Введение параметра  $\omega$  позволяет ограничить на величину параметра порядка -  $\eta \in (0,1)$ . Связь процесса эксплуатации сооружения, ассоциируемого с развитием размытого фазового превращения, позволяет схематично представить зависимость  $\omega = \omega(\eta)$  в форме кривой логистического [2] типа (рис.1)



# ВЕСТНИК МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЭКСПЕРТОВ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ

*Рис.1.*

Характер поведения функции  $\omega = \omega(\eta)$  предусматривает наличие точки перегиба при  $\eta = \eta_0$ , отвечающей за смену типа устойчивости, заложенную в модели (3.5)

$$\eta_0 = \eta_2 = F - F_c \quad (5.2)$$

## **Заключение**

Введением параметра повреждаемости утверждается, что строительного объекта не является мгновенным актом и представляет собой процесс, подготавливаемый с самого начала эксплуатации за счет накопления несовершенств  $\beta$ . В зависимости от характеристики объекта параметр несовершенства  $\beta$  может принимать любые значения, для установления которого одного условия равновесия (3.8) недостаточно. Поэтому целесообразной представляется разработка системы эволюционных уравнений, связывающих внешние воздействия и несовершенства с повреждаемостью. Наиболее сложной можно считать задачу о формулировке граничных условий для параметра несовершенства  $\beta$ . Указанные условия удобно записать для параметра повреждаемости  $\omega$ , кинетически выразив его через параметр несовершенства  $\beta$  и, как следствие через силовые воздействия.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Клюева Н.В., Бондаренко В.М., Пискунов А.В.** Прикладная диссипативная теория конструктивной безопасности железобетона//Известия Орел ГТУ. Серия «строительство, транспорт». 2009. №1/21. -с.8-18.
2. **Малинецкий Г.Г.** Математические основы синергетики – М.:КомКнига, 2005.-312с.
3. **Китаева Д.А., Пазылов Ш.Т., Рудаев Я.И.** О приложениях методов нелинейной динамики в механике материалов//Вестник Пермского Государственного Технического Университета. Математическое моделирование систем и процессов. - 2007. - №15. – с.46-70.
4. **Рудаев Я.И.** Элементы нелинейной динамики в механике материалов и конструкций//Вестник КРСУ. – 2017.т.17.№1.с.42-51.
5. **Маматов Ж.Ы.** О необратимой деформации горных пород//Проблемы естественно-технических наук, информационных технологий и управления на современном этапе. Бишкек. Изд-во КГУСТА, 2003. - стр. 222-232.

ВЕСТНИК МЕЖДУНАРОДНОЙ АССОЦИАЦИИ ЭКСПЕРТОВ ПО СЕЙСМОСТОЙКОМУ  
СТРОИТЕЛЬСТВУ

6. **Рудаев Я.И., Китаева Д.А., Мамадалиева М.А.** Моделирование деформационного поведения горных пород//Записки горного института. -2016. – т.222. – с.816-822.
7. **Adigamov N.S., Rudayev Ya.J.** Education of state allowing for loss strength of materials//Journal of Mining Science. – 1999. – vol.35. - №4. – p.353-360.
8. **Нелинейные волны, структуры и бифуркации/под ред.**
9. **Хакен Г.** Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.:ЛЕНАНД, - 2014. – 320с.
10. **Гилмор Р.** Прикладная теория катастроф. ч.1. – М.:Мир, 1984. – 285с.
11. **Райзер В.Д.** Теория надежности сооружений. – М.: АСВ, 2010.-384с.
12. **Хайтун С.Д.** Механика и необратимость. – М.: Янус, 1996. – 448с.
13. **Качанов Л.М.** О времени разрушения в условиях ползучести. //Изв. АН СССР. -ОТН. -1958. -№ 8.
14. **Работнов Ю.Н.** О разрушении вследствие ползучести. //ПМТД. -1963. №2