

УДК 539.3

АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СООРУЖЕНИЙ ПРИ УЧЕТЕ ПРОЦЕССОВ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ

© 2024 г. Ж. Ы. Маматов^{а,*}, А. А. Абдыкалыков^а, Н. У. Шамшиев^а

*^аКыргызский государственный технический университет
им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан*

**e-mail: mamatov-zh@kstu.kg*

Поступила в редакцию 04.10.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принята к публикации 28.11.2023 г.

Рассмотрены причины возникновения отказов, следствием которых можно считать прогрессирующие обрушения сооружений и учет конструктивной безопасности в более расширенных представлениях, чем при оценке по первой и второй группам предельных состояний для малоэтажных зданий, построенных из местных материалов.

Ключевые слова: прогрессирующие обрушения, несущая способность, эксплуатационная пригодность, конструктивная безопасность, живучесть, предельные состояния, сейсмические нагрузки, местные материалы, землетрясение.

DOI: 10.31857/S1026351924030046, EDN: UIGLBO

1. Введение. 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 запроектным воздействиям [1]. Подобные воздействия часто приводят к неожиданным отказам сооружений, которые обуславливают экономический ущерб и, как правило, гибель людей. В последнее время при проектировании многоэлементных систем решаются противодействия каскадному развитию отказов, недопущению прогрессирующего разрушения. В нормах США и Канады введено понятие “целостности” (integrity) сооружения [2]. В работе [3] отмечается, что представляется уместным наряду с понятиями “несущая способность” и “эксплуатационная пригодность” ввести понятия “живучесть” [4, 5] и определить еще одну группу предельных состояний. Предлагаемая [3] третья группа предельных состояний (по живучести) включает предельные состояния, характеризующиеся лавинообразным развитием отказов, приводящих к полному выходу из строя элементов системы. Условия обеспечения надежности заключаются в том, чтобы расчетные значения нагрузок или вызванных ими усилий, напряжений, деформаций, перемещений

не превышали соответствующих им предельных значений, устанавливаемых нормами проектирования конструкций.

Анализ причины возникновения отказов, следствием которых можно считать прогрессирующие обрушения сооружений, определяют актуальность и практическое приложение постановки задач конструктивной безопасности в более широких 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 методов нелинейной динамики [6–8] с обеспечением не только конструктивной безопасности, но и живучести объектов.

2. Постановка задачи. Следуя работе [9], полагаем, что моделирование реальной, нелинейной физико-механической системы динамического типа начинается с введения координат состояния $\eta_i (i \in \overline{1, \kappa})$, называемых параметрами порядка. К ним добавляется дополнительное множество параметров F_i , имитирующих отклик на изменение параметров η_i и представляющих собой внешние воздействия. Кроме того, предполагается наличие параметров β_i , ответственных за дефекты (несовершенства) исходного состояния системы и развивающиеся в процессе ее эксплуатации.

Принимая во внимание вышесказанное, рассмотрим задачу моделирования несущей способности строительного объекта, которая ассоциируется с нелинейной динамической физико-механической системой.

Текущее состояние системы представим в виде диссипативной среды, которой соответствует потенциальная функция вида:

$$\Phi = \Phi(F, \eta, \beta), \quad (2.1)$$

где, как принято выше, F , η – силовой и деформационно-временной факторы, β – параметр повреждаемости или несовершенства.

Далее полагаем, что в процессе эксплуатации сооружения проходит ряд состояний, заметное изменение которых осуществляется путем смен 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 [8–11]. В частности была разработана математическая модель [12–16] для анализа способности распространения и удельной энергии горизонтально поляризованных сдвиговых поверхностных волн (SH-волн) в многослойных пластинах.

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 соответствии с классификацией пространственно-временных диссипативных структур [17] 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.

По сути, в процессе эксплуатации в объектах возникают синергетические эффекты [7, 18], причем при медленном характере внешнего воздействия их можно отнести к самоорганизации через управляющие параметры β_i . Приведенные рассуждения свидетельствуют о полезности привлечения при детерминированном моделировании методов математической теории катастроф [19].

3. Динамическая модель. При формулировке модели градацию процесса эксплуатации будем рассматривать как дискретную марковскую процедуру [20], в соответствии с которой последующие воздействия обусловлены лишь предыдущими событиями и не зависят от предшествующей истории нарушения.

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

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

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 η 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 ($F \rightarrow F$), то потенциальная функция $\Phi = \Phi(F, \eta)$ запишется в виде:

$$\Phi_p(F, \eta) = \frac{1}{2}(F - F)\eta^2 + \frac{1}{3}\eta^3 + \dots \quad (3.4)$$

В выражении (2.4) произведена смена масштабов по осям F и η .

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

Критические точки, соответствующие (3.4), определяются их соотношением:

$$\frac{d}{d\eta} = 0 = \eta[(F_c - F) + \eta]. \quad (3.5)$$

Решение уравнения (3.5) дает два корня:

$$\eta_1 = 0; \quad \eta_2 = F - F_c. \quad (3.6)$$

Отсюда следует, что для совершенной системы смена состояний происходит в момент, когда критические точки η_1 и η_2 проходят одна через другую.

Возмущение $S(\eta, \beta)$ представим в виде морсовского разложения [19]. Имеем:

$$S(\eta, \beta) = \beta_1\eta + \frac{1}{2}\beta_2\eta^2 + \frac{1}{3}\beta_3\eta^3 + \dots \quad (3.7)$$

Формула (3.7), как ясно из работы [10], может быть представлена в канонической форме [6] 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 β_i .

Поэтому, следуя работе [19], отбросим в (3.7) все члены, кроме линейного.

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

$$\Phi(F, \eta, \beta) = \beta_1\eta + \frac{1}{2}(F - F)\eta^2 + \frac{1}{3}\eta^3. \quad (3.8)$$

Критические точки отвечают равновесному состоянию и определяются условием:

$$\frac{d\Phi}{d\eta} = \beta_1 + (F - F)\eta + \eta^2 = 0. \quad (3.9)$$

Уравнение (3.9) с точки зрения теории катастроф можно рассматривать как двумерное многообразие, заключенное в пространство $|R|^3$ с координатными осями η , F , β_1 . Состояния равновесия будут найдены для каждого $\beta_1 = \text{const}$.

Отметим, что поведение несовершенной системы зависит от знака параметра несовершенства $\beta = \beta_1$. Из решения уравнения (3.9)

$$\eta_{1,2} = -\frac{F - F}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{F - F}{2}\right)^2 - \beta} \quad (3.10)$$

видно, что при $\beta < 0$ существуют две критические точки, а при $\beta > 0$ имеется область, в которой функция (3.8) вообще не имеет критических точек. Последнее имеет место при выполнении условия:

$$\left(\frac{F_c - F}{2}\right)^2 - \beta < 0. \quad (3.11)$$

Проанализируем полученные результаты:

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 κ : $|\eta| > \kappa$.

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 β_1, β_2, \dots , а сильно — от $\beta_1 = \beta$. Поэтому принятое выше решение исключить все возмущения, кроме линейного (3.8), можно считать объективным.

3. Для несовершенных объектов, описываемых потенциальной функцией (3.8), 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 за-проектных решений [1] в форме появления “странных аттракторов” [21]. Последнее требует отдельного рассмотрения.

4. 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 (3.8) к возможным флуктуирующим воздействиям можно считать параметр несовершенства β . Поскольку рассматриваемый подход для моделирования необратимых процессов, сопровождающих эксплуатацию сооружений, относятся к синергетическому, то решающее значение придается процессу управления указанным параметром. Вполне очевидно, что параметр несовершенства β можно считать вероятностной характеристикой.

С другой стороны, за последнее тридцатилетие получила значительное развитие механика разрушения, основанная на концепции накопления повреждений [22, 23]. Интегральная характеристика процесса накопления повреждений названа параметром повреждаемости.

Отметим, что пионерским здесь следует считать исследование [22], в котором впервые была введена мера повреждаемости (скалярная функция ψ).

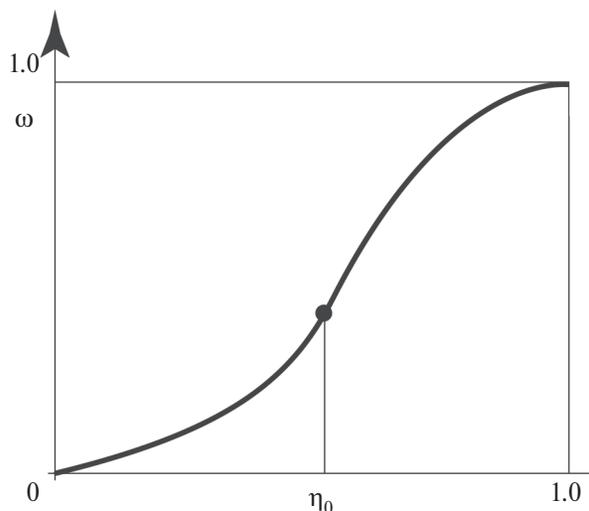


Рис. 1. Зависимость параметра повреждаемости ω от параметра порядка η .

Предполагалось, что функция ψ принимает нулевое значение при разрушении и равняется единице при полном отсутствии ψ несовершенств. В работе [23] предложен параметр ψ , определяемый через функции ψ зависимости $\omega = 1 - \psi$.

Параметр ω назван параметром повреждаемости и оказался более востребованным, чем параметр сплошности ψ .

Введение параметра повреждаемости ω 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 [6] типа (рис. 1).

Характер поведения функции $\omega = \omega(\eta)$ предусматривает наличие точки перегиба при $\eta = \eta_0$, отвечающей за смену типа устойчивости, заложенную в модели (3.6).

Введением параметра повреждаемости утверждается, что разрушение строительного объекта не является мгновенным актом и представляет собой процесс, подготавливаемый с самого начала эксплуатации за счет накопления несовершенств β . В зависимости от характеристики объекта параметр несовершенства β может принимать любые значения, для установления которого одного условия равновесия (3.9) 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 β . Указанные условия удобно записать для параметра повреждаемости ω , кинетически выразив его через параметр несовершенства β и, как следствие, через силовые воздействия посредством уравнения (3.9).

5. Эволюционное уравнение для параметра повреждаемости. При синергетической концепции поведения сооружения для изучения эволюции параметра повреждаемости ω приемлем подход, описываемый в неравновесной статистической механике уравнением Фоккера–Планка [18, 24]. Последнее, как известно [25], получено для Марковских процессов, заложенных в модели.

Для одномерного случая нестационарное уравнение Фоккера–Планка представлено [24] в виде:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \eta}(\gamma \eta \omega) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial \eta^2}(Q \omega). \quad (5.1)$$

Здесь параметр повреждаемости $\omega = \omega(\eta, t)$ – функция распределения плотности вероятности γ [18] для обобщенной координаты η (параметр порядка); обозначим через $R = \gamma \eta$ – коэффициент сноса или “дрейфа” [25]; $Q = Q(\eta)$ – коэффициент диффузии, γ – коэффициент трения, t – время.

Заметим, что дифференциальное уравнение (5.1) описывает [25] монотонную необратимую эволюцию любого начального распределения плотности ω к равновесному состоянию. Средний член уравнения (5.1) считается ответственным за процессы торможения (задержки) и называется динамическим трением.

Рассмотрим стационарный вариант уравнения Фоккера–Планка [26], ассоциируемого с условием неразрывности. Это означает, что в процессе эксплуатации сооружения не наблюдаются эффекты разрушительного свойства [20].

Легко увидеть, что стационарный вариант уравнения (5.1) представляется в форме:

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[-\gamma \eta \omega + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (Q \omega) \right] = 0. \quad (5.2)$$

Первый интеграл уравнения (5.2) при положении естественных граничных условий ($\omega|_{\eta \rightarrow \pm \infty} = 0$) приводится к виду:

$$\frac{1}{2} Q \frac{d\omega}{d\eta} = R \omega. \quad (5.3)$$

Здесь принято условие постоянства коэффициента диффузии, которое можно считать вполне логичным.

Интегрируя уравнение (5.3), получим:

$$\omega(\eta) = A \exp\left(-\frac{2\bar{\Phi}(\eta)}{Q}\right), \quad (5.4)$$

где

$$\bar{\Phi}(\eta) = - \int_{\eta_0}^{\eta} R(\eta) d\eta \quad (5.5)$$

имеет смысл потенциала.

Нормировочный множитель A удовлетворяет условию:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(\eta) d\eta = 1. \quad (5.6)$$

Потенциальность $\bar{\Phi}(\eta)$ приводит к необходимости анализировать процесс с позиций равновесия градиентных динамических систем [19]. Это предполагает, что эксплуатация сооружения представляется существенно нелинейным процессом, поэтому можно принять функцию $\bar{\Phi}(\eta)$ в виде элементарной кастраффы типа сборки [19]. Имеем:

$$\bar{\Phi}(\eta) = \frac{a_0}{2} \eta^2 + \frac{b_0}{4} \eta^4, \quad (5.7)$$

где a_0, b_0 – неизвестные константы, подлежащие определению.

Принятие потенциала $\bar{\Phi}(\eta)$ в форме (5.7) позволяет антиградиент (коэффициент сноса) записать в таком виде:

$$R(\eta) = -a_0 \eta - b_0 \eta^3. \quad (5.8)$$

Подставляя (5.8) в уравнение (5.3), после интегрирования которого будем иметь:

$$\omega = A \exp \left[\frac{1}{Q} \left(-a_0 \eta^2 - \frac{1}{2} b_0 \eta^4 \right) \right], \quad (5.9)$$

где A – постоянная интегрирования.

Дифференцируя (5.9) по времени t , получим:

$$\frac{d\omega}{dt} = A \exp \left[-\frac{1}{Q} \left(a_0 \eta^2 + \frac{1}{2} b_0 \eta^4 \right) \right] \left[-\frac{2}{Q} \left(a_0 \eta + 2b_0 \eta^3 \right) \frac{d\eta}{dt} \right].$$

Учитывая (5.9), вместо последнего уравнения получим:

$$\frac{d \ln \omega}{dt} = -\frac{2}{Q} \left(a_0 \eta + 2b_0 \eta^3 \right) \frac{d\eta}{dt}. \quad (5.10)$$

Дифференциальное уравнение (5.10), после определения входящих в него материальных функций, можно рассматривать как эволюционное, характеризующее изменчивость параметра повреждаемости во времени.

Остановимся на определении материальных констант.

Рассмотрим уравнение (5.9), после подстановки его в условие нормировки интеграл (5.6) переписывается так:

$$\int_{-\infty}^{\infty} A \exp \left[-\frac{1}{Q} \left(a_0 \eta^2 + \frac{1}{2} b_0 \eta^4 \right) \right] d\eta = 1. \quad (5.11)$$

Вычисление с использованием [27] интеграл (5.11) дает:

$$A \left(\frac{m}{2} \right)^{1/2} \exp \lambda \kappa_{1/4}(\lambda) = 1, \quad (5.12)$$

где обозначено $m = a_0/b_0$; $\lambda = a_0 m / (4Q)$; $\kappa_{1/4}(\lambda)$ – модифицированная функция Ханкеля.

Вполне естественно, принимается условие (рис. 1)

$$\frac{d^2 \omega}{d\eta^2} \Big|_{\eta=\eta_0} = 0, \quad (5.13)$$

следствием которого является уравнение:

$$\frac{2b_0}{Q} (m\eta_0 + \eta_0^3)^2 - \eta_0 - 3\eta_0^2 = 0. \quad (5.14)$$

Кроме этого, очевидно, что

$$\omega \Big|_{\eta=1} = 1 \quad (5.15)$$

или

$$\exp \left[-\frac{b_0}{2Q} \left(2\frac{a_0}{b_0} + 1 \right) \right] = 1. \quad (5.16)$$

Последнее условие можно переписать так:

$$\ln \left(\frac{1}{A} \right) = -\frac{b_0}{2Q} (2m + 1). \quad (5.17)$$

Таким образом, получены три уравнения (5.2), (5.4), (5.7), связывающие параметры A , a_0 , b_0/Q , необходимые для определения вида функции повреждаемости (5.9).

Установим теперь связь между параметрами повреждаемости ω и несовершенства β . При этом учитываем, что начальным условиям отвечают значения:

$$\omega_{/\eta=\eta^*} = \omega^*, \quad \beta_{/\eta=\eta^*} = \beta^*,$$

где β^* – параметр, отвечающий за начальные несовершенства при значении параметра порядка $\eta = \eta^*$.

Полагаем, что на изменение параметра повреждаемости ω на малое значение $d\omega$ параметр несовершенства β откликается на величину, пропорциональную β . Поэтому можно положить, что

$$d\beta = -\beta K(\omega, \omega^*) d\omega, \quad (5.18)$$

где $K(\omega, \omega^*)$ – ядро, убывающее с ростом ω и ω^* .

Решение дифференциального уравнения (5.18), подобно как в работе [10], представим в виде:

$$\beta(\omega) = \beta_* Q(\omega, \omega_*), \quad (5.19)$$

причем

$$Q(\omega) = \exp \left[- \int_0^{\omega} K(\omega - \omega_*) d\omega \right]. \quad (5.20)$$

Ядро оператора (5.20) примем в форме:

$$K(\omega - \omega_*) = \frac{1 - n}{(\omega - \omega_*)^n} \quad (5.21)$$

где n – постоянная величина.

После подстановки уравнения (5.21) в формулу (5.20) при $\omega_* = 0$ и вычисления интеграла получим:

$$Q(\omega) = \exp[-\omega^{1-n}]. \quad (5.22)$$

С учетом (5.22) решение (5.19) запишется следующим образом:

$$\beta(\omega) = \beta_* \exp[-\omega^{1-n}]. \quad (5.23)$$

Обратимся теперь к условию равновесия (3.9)

$$\left(\frac{d\Phi}{d\eta} = \beta_1 + (F - F)\eta + \eta^2 = 0 \right),$$

которое, полагая $\beta_1 = \beta$, переписывается так:

$$F - F_C = \frac{\beta}{\eta} + \eta. \quad (5.24)$$

Уравнение (5.24), если положить $\beta = \beta_*$, позволяет установить связь между начальными несовершенствами и изменением эксплуатационных характеристик в форме:

$$\beta_* = (F - F_C)\eta_* - \eta_*^2. \quad (5.25)$$

Понятно, что начальному значению параметра несовершенства β_* соответствует начальный параметр порядка η_* . При переходе материала в запредельную область сопутствует смена типа устойчивости, обусловленная сильными структурными флуктуациями. Поэтому появление на графике $\beta \sim \eta$ точки перегиба, соответствующей пределу прочности материала ($\eta = \eta_0$), вполне предсказуемо.

В связи со сказанным уточнится зависимость параметра несовершенства от параметра порядка (рис. 2).

6. Определение материальных функций. Вернемся к рассмотрению уравнений (5.2), (5.4), (5.6), решение которых дает возможность установления материальных функций, существенно зависящих от параметра порядка $\eta = \eta_0$, соответствующего смене типа устойчивости.

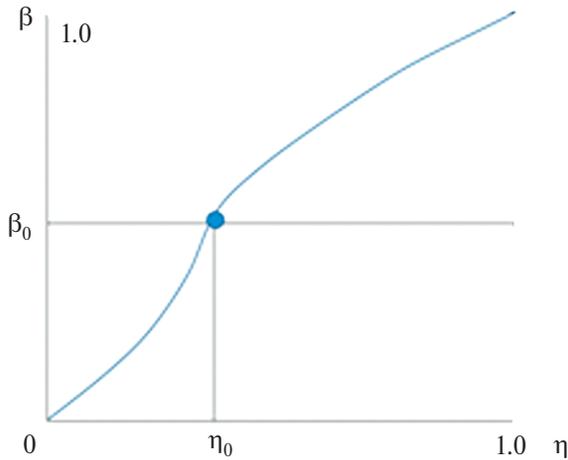


Рис. 2. Зависимость параметра несовершенства β от параметра порядка η .

Уравнение (5.14) дает возможность установить связь между величинами ϵ_0/Q и m в виде:

$$\frac{\epsilon_0}{Q} = \frac{\eta_0 + 3\eta_0^2}{2(m\eta_0 + \eta_0^3)}. \quad (6.1)$$

Результаты расчетов должны быть представлены в ϵ_0/Q от m при различных значениях η_0 .

Формула (5.9) с учетом введенных обозначений может быть записана так:

$$\omega = \exp\left[-\frac{\epsilon_0}{2Q}(2m\eta^2 + \eta^4)\right]. \quad (6.2)$$

При $\eta = \eta_0$ получим:

$$\omega(\eta_0) = \exp\left[-\frac{\epsilon_0}{2Q}(2m\eta_0^2 + \eta_0^4)\right]. \quad (6.3)$$

Напомним, что параметр ϵ_0/Q , A , m являются функциями параметра порядка $\eta = \eta_0$.

Равенство (5.12) разрешим относительно величины $1/A$. Имеем:

$$\frac{1}{A} = \sqrt{\frac{m}{2}} \exp \lambda \kappa_{1/4}(\lambda), \quad (6.4)$$

где, как и выше,

$$\lambda = \frac{a_0 m}{4Q}. \quad (6.5)$$

С другой стороны, на основании (5.17) можем записать:

$$\ln\left(\frac{1}{A}\right) = -\frac{b_0}{2Q}(2m+1). \quad (6.6)$$

Приравняв правые части (6.4) и (6.6) друг другу, получим трансцендентное уравнение:

$$\lambda + \frac{b_0}{2Q}(2m+1) + \ln\sqrt{\frac{m}{2}} + \ln\kappa_{1/4}(\lambda) = 0 \quad (6.7)$$

или

$$\frac{b_0 m^2}{4Q} + \frac{b_0}{2Q}(2m+1) + \ln\sqrt{\frac{m}{2}} + \ln\kappa_{1/4}\left(\frac{b_0 m^2}{4Q}\right) = 0. \quad (6.8)$$

Перейдем теперь к уловию (5.23), которое перепишем так:

$$\ln\frac{\beta(\omega)}{\beta_*} = -\omega^{1-n}, \quad (6.9)$$

где $\omega = \omega_0$ определяется формулой (6.3).

Далее полагаем

$$\lg\left[\ln\frac{\beta(\omega)}{\beta_*}\right] = (1-n)\lg(-\omega). \quad (6.10)$$

Совершенно очевидно, что показатель степени $n = n(\eta_0)$.

Алгоритм решения задачи по определению материальных функций – следующий. После нахождения материальных функций могут быть построены зависимости $\beta - \eta$ и, как следствие, сделаны выводы о влиянии начальных и последующих несовершенств на эксплуатационные характеристики строительных объектов вплоть до исчерпания несущей способности. Здесь необходимо отметить, что разработанная концепция прогрессирующего разрушения может применяться и для других объектов, например при создании элементов конструкций с заданной диссипацией энергии или заданным порогом разрушения (см. [28–30]).

1. На основании соотношения (6.1) осуществляется построение графиков материальных функций, определяются зависимости b_0/Q от m при разных значениях $\eta_0 \in (0,1)$ и осуществляется их аппроксимация.

2. Наиболее технически сложным будет решение с использованием (6.7) трансцендентного уравнения (6.8) относительно параметра m .

3. При известном параметре m по формуле (6.6) определяется $A = A(\eta_0)$.

4. Вычисляется $\omega(\eta_0)$ по формуле (6.3).

5. При заданной разнице $F - F_c$ и параметре η_* устанавливается β_* .

6. При известной разнице $F - F_c$ и величине $\eta = \eta_0$ вычисляется значение $\beta = \beta(\eta_0)$.

7. Далее, используя (6.10), устанавливается $n = n(\eta_0)$.

Выводы. Показано, что живучесть инженерных сооружений может быть смоделирована потенциальной функцией, зависящей от силовой составляющей F . Текущее состояние объекта связано с критическими точками потенциальной функции. При этом устойчивость состояния определяется с привлечением морсовской характеристики потенциала в критической точке, а критическая нагрузка, которую может выдержать сооружение, — вырождением критических точек. Следовательно, изучение статического поведения объекта, находящегося под нагрузкой, и его чувствительность к несовершенству тесно связано с теорией катастроф.

Выбор вида потенциальной функции обусловлен, как показано выше, соображениями физического характера. Это позволило универсализировать возмущающую составляющую потенциальной функции, использованной для определения чувствительности критической нагрузки к несовершенствам любых типов.

Заметим, что в настоящем исследовании речь идет об объектах, принимаемых как единое целое. При рассмотрении сооружения как дискретного (составного) объекта делаем чувствительность к несовершенствам более жесткой, особенно при динамических воздействиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондаренко В.М., Клюева Н.В., Пискунов А.В.* Прикладная диссипативная теория конструктивной безопасности железобетона // Известия Орел ГТУ. Серия Строительство, транспорт. 2009. № 1/21. С. 8–18.
2. Design of buildings to resist progressive collapse. United Facilities Criteria (UFC)-4-023-03. 2005. 139 p.
3. *Мкртычев О.В., Райзер В.Д.* Теория надежности в проектировании строительных конструкций. Монография. М.: Изд-во АСВ, 2016. 908 с.
4. *Перельмутер А.В.* Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Киев.: Изд. УкрНИИпроектстальконструкция. 1999. 210 с.
5. *Райзер В.Д.* Оценка риска при проектировании сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. № 4. С. 15–18.
6. *Малинецкий Г.Г.* Математические основы синергетики. М.: КомКнига, 2005. 312 с.
7. *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.
8. *Рудаев Я.И.* Элементы нелинейной динамики в механике материалов и конструкций // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 1. с. 42–51.
9. *Маматов Ж.Ы.* О необратимой деформации горных пород // Проблемы естественно-технических наук, информационных технологий и управления на современном этапе. Бишкек: Изд-во КГУСТА, 2003. с. 222–232.
10. *Рудаев Я.И., Китаева Д.А., Мамадалиева М.А.* Моделирование деформационного поведения горных пород // Записки горного института. 2016. Т. 222. С. 816–822.
11. *Adigamov N.S., Rudayev Ya.J.* Education of state allowing for loss strength of materials // J. Min. Sci. 1999. V. 35. № 4. P. 353–360.

12. *Djeran-Maigre I. et al.* Velocities, dispersion, and energy of SH-waves in anisotropic laminated plates // *Acoust. Phys.* 2014. V. 60. P. 200–207.
<https://doi.org/10.1134/S106377101402002X>
13. *Ilyashenko A.V., Kuznetsov S.V.* Pochhammer–Chree waves: polarization of the axially symmetric modes // *Arch. Appl. Mech.* 2018. V. 88. P. 1385–1394.
<https://doi.org/10.1007/s00419-018-1377-7>
14. *Kuznetsov S.V.* On the operator of the theory of cracks // *C. R. Acad. Sci. Paris.* 1996. V. 323. P. 427–432.
15. *Kuznetsov S.V.* Fundamental and singular solutions of Lamé equations of media with arbitrary anisotropy // *Quart. Appl. Math.* 2005. V. 63 (3). P. 455–467.
<https://doi.org/10.1090/S0033-569X-05-00969-X>
16. *Kuznetsov S.V., Terentjeva E.O. et al.* Planar internal Lamb problem: Waves in the epicentral zone of a vertical power source // *Acoust. Phys.* 2015. V. 61(3). P. 356–367.
<https://doi.org/10.1134/S1063771015030112>
17. Нелинейные волны, структуры и бифуркации / Ред. А.В. Гапонов-Греков, М.И. Рабинович. М.: Наука, 1983. 263 с.
18. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: ЛЕНАНД, 2014. 320 с.
19. *Гилмор Р.* Прикладная теория катастроф. Ч. I. М.: Мир, 1984. 285 с.
20. *Райзер В.Д.* Теория надежности сооружений. М.: АСВ, 2010. 384 с.
21. *Хайтун С.Д.* Механика и необратимость. М.: Янус, 1996. 448 с.
22. *Качанов Л.М.* О времени разрушения в условиях ползучести // *Изв. АН СССР. ОТН.* 1958. № 8. С. 26–31.
23. *Работнов Ю.Н.* О разрушении вследствие ползучести // *ПМТФ.* 1963. № 2. С. 113–123.
24. *Балеску Р.* Равновесная и неравновесная статистическая механика. М.: Мир, 1978. 399 с.
25. *Богачев В.И., Крылов Н., Рекнер М., Шапошников С.В.* Уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова. Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2003.
26. *Кириллов А., Шапошников С.В., Богачев В.И.* Стационарное уравнение Фоккера–Планка с потенциалом // *ДАН РФ.* 2014. Т. 454. № 2. С. 131–137.
<http://doi.org/10.1134/S1064562414010074>
27. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. СПб.: БХВ – Петербург, 2011. 1232 с.
28. *Li S. et al.* Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains // *Comp. Geotech.* 2019. V. 109. P. 69–81.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.01.019>
29. *Li S. et al.* Explicit/implicit multi-time step co-simulation in unbounded medium with Rayleigh damping and application for wave barrier // *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2020. V. 24. P. 2400–2421.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1506826>
30. *Cairns D.S. et al.* Progressive damage analysis and testing of composite laminates with fiber waves // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2016. V. 90. P. 51–61.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.03.005>

ANALYSIS OF STRUCTURAL SAFETY OF STRUCTURES WHEN ACCOUNTING PROCESSES OF PROGRESSIVE DESTRUCTION**Zh. Y. Mamatov^{a, *}, A. A. Abdykalykov^a, N. U. Shamshiev^a**^a*Kyrgyz State Technical University n.a. I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan*^{*}*e-mail: mamatov-zh@kstu.kg*

Abstract – The reasons for the occurrence of failures are considered, the consequence of which can be considered the progressive collapse of structures and the consideration of structural safety in more expanded concepts than when assessing the first and second groups of limit states for low-rise buildings built from local materials.

Keywords: progressive collapses, bearing capacity, serviceability, structural safety, survivability, limit states, seismic loads, local materials, earthquake

REFERENCES

1. *Klyueva N.V., Bondarenko V.M., Piskunov A.V.* Applied dissipative theory of structural safety of reinforced concrete // *Izvestia Orel State Technical University. Series “construction, transport”*. № 1/21, 2009. p. 8–18.
2. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse United Facilities Criteria (UFC)-4-023-03. 2005. 139 pp.
3. *Mkrtychev O.V., Raiser V.D.* Reliability theory in the design of building structures. Monograph. M.: Publishing House ASV. 2016. 908 pp.
4. *Perelmuter A.V.* Selected problems of reliability and safety of building structures. Kiev: Publishing house. UkrNIIproektstakonstruksiya. 1999. 210 pp.
5. *Raiser V.D.* Risk assessment in the design of structures // *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2007. P. 15–18.
6. *Malinetsky G.G.* Mathematical foundations of synergetics. M.: KomKniga, 2005. 312 p.
7. *Kitaeva D.A., Pazylov Sh.T., Rudaev Ya.I.* On applications of nonlinear dynamics methods in the mechanics of materials // *Bulletin of the Perm State Technical University. Mathematical modeling of systems and processes*. № 15. 2007. P. 46–70.
8. *Rudaev Ya.I.* Elements of nonlinear dynamics in the mechanics of materials and structures // *Bulletin of KRSU*. V.17, № 1. 2017. P. 42–51.
9. *Mamatov Zh.Y.* On irreversible deformation of rocks // *Problems of natural sciences, information technologies and management at the present stage*. Bishkek. Publishing house KSUCTA. 2003. P. 222–232.
10. *Rudaev Ya.I., Kitaeva D.A., Mamadalieva M.A.* Modeling the deformation behavior of rocks // *Notes of the Mining Institute*, V. 222. 2016. P. 816–822.
11. *Adigamov N.S., Rudayev Ya.J.* Education of state allowing for loss strength of materials // *Journal of Mining Science*, V. 35. № 4. 1999. P. 353–360.
12. *Djeran-Maigre I. et al.* Velocities, dispersion, and energy of SH-waves in anisotropic laminated plates // *Acoust. Phys.* 2014. V. 60(2). P. 200–207.
<https://doi.org/10.1134/S106377101402002X>

13. *Ilyashenko A.V. et al.* Pochhammer–Chree waves: polarization of the axially symmetric modes // Arch. Appl. Mech. 2018. V. 88. P. 1385–1394.
<https://doi.org/10.1007/s00419-018-1377-7>
14. *Kuznetsov S.V.* On the operator of the theory of cracks // C. R. Acad. Sci. Paris. 1996. V. 323. P. 427–432.
15. *Kuznetsov S.V.* Fundamental and singular solutions of Lamé equations of media with arbitrary anisotropy // Quart. Appl. Math. 2005. V. 63 (3). P. 455–467.
<https://doi.org/10.1090/S0033-569X-05-00969-X>
16. *Terentjeva E.O. et al.* Planar internal Lamb problem: Waves in the epicentral zone of a vertical power source // Acoust. Phys. 2015. V. 61 (3). P. 356–367.
<https://doi.org/10.1134/S1063771015030112>
17. Nonlinear waves, structures and bifurcations / Ed. A.V. Gaponov-Grekov, M.I. Rabinovich. M.: Nauka. 1983. 263 p.
18. *Haken G.* Information and self-organization. Macroscopic approach to complex systems. – M.: LENAND. 2014. 320 p.
19. *Gilmore R.* Applied theory of disasters. Part I. M.: Mir. 1984. 285 p.
20. *Raiser V.D.* Theory of reliability of structures. M.: ASV. 2010. 384 p.
21. *Khaitun S.D.* Mechanics and irreversibility. M.: Janus. 1996. 448 p.
22. *Kachanov L.M.* On the time of destruction under creep conditions // Izv. USSR Academy of Sciences, OTN. № 8. 1958.
23. *Rabotnov Yu.N.* On fracture due to creep // PMTF. № 2, 1963. P. 113–123.
24. *Balescu R.* Equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics, V. 2. M.: Mir. 1978. 399 p.
25. *Bogachov V.I., Krylov N., Rekner M., Shaposhnikov S.V.* Fokker-Planck–Kolmogorov equation. 2003. Izhevsk: Scientific Research Center Regular and Chaotic Dynamics
26. *Kirillov A., Shaposhnikov S.V., Bogachev V.I.* Stationary Fokker-Planck equation with potential // DAN RF, V. 454. № 2. 2014. P. 131–137.
27. *Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M.* Tables of integrals, sums, series and products. – St. Petersburg: BHV-Petersburg. 2011. 1232 p.
28. *Li S. et al.* Hybrid asynchronous absorbing layers based on Kosloff damping for seismic wave propagation in unbounded domains // Comp. Geotech. 2019. V. 109. P. 69–81.
29. *Li S. et al.* Explicit/implicit multi-time step co-simulation in unbounded medium with Rayleigh damping and application for wave barrier // Eur. J. Environ. Civ. Eng. 2020. V. 24. P. 2400–2421.
30. *Cairns D.S. et al.* Progressive damage analysis and testing of composite laminates with fiber waves // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 2016. V. 90. P. 51–61.