

МЕТОД РАСЧЕТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ СИСТЕМ (В ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ, С МАТРИЦЕЙ ЖЕСТКОСТИ)

В.Г. Себешев, канд. техн. наук, профессор,

Ю.А. Гербер, магистр, ст. преподаватель

(НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

Представлен метод расчета параметров комплекса динамических гасителей колебаний (ДГК), используемых для уменьшения перемещений и усилий в линейно деформируемой системе с конечным числом степеней свободы при установившихся гармонических вынужденных колебаниях. Задача гашения колебаний сформулирована и решена как задача регулирования динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) системы с ДГК в качестве регуляторов. Объединением и последующим преобразованием уравнений движения (в амплитудах перемещений) и условий регулирования (в виде равенств перемещений системы в местах крепления гасителей требуемым значениям) получено аналитическое выражение для определения массы и жесткости каждого ДГК, учитывающее динамическое НДС системы с ограничениями в форме условий регулирования. Решение получено в форме МКЭ (в перемещениях) с использованием матрицы динамической жесткости системы. Разработанный метод верифицирован на модельной задаче регулирования динамического НДС балочной системы группой ДГК, решение которой известно. Возможность применения изложенного подхода в расчетах гашения колебаний сооружений и конструкций показана на примерах плоских многоэлементных стержневых систем. Полученные количественные и качественные результаты показывают существенное снижение уровня перемещений и усилий в системе с гасителями в сравнении с незащищенной конструкцией

ВЛИЯНИЕ МАССОВО- ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИИ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Е.Ф. Храпунов, канд. физ.-мат.наук., инженер 1 категории

**(Крыловский государственный научный центр,
г. Санкт-Петербург)**

Поведение гибких конструкций (большепролетных мостов, высотных зданий и пр.) в воздушном потоке определяется большим количеством различных параметров, в том числе характеристиками самой конструкции и характеристиками воздушного потока. Опыт показывает, что даже небольшие изменения в форме конструкции могут приводить к существенным изменениям параметров отклика. В настоящее время наиболее достоверным источником информации о динамическом отклике гибкого сооружения является физическое моделирование – экспериментальные исследования, проводимые в аэродинамических трубах. Варьирование массово- жесткостных характеристик испытываемой модели позволяет получать наиболее полную информацию о характеристиках воздействия воздушного потока, в том числе установить границы возникновения явлений аэродинамической неустойчивости.

В работе представлены результаты параметрического исследования модели упрощенной формы (секционной модели большепролетного балочного моста) при варьировании ее массы и коэффициента демпфирования. При проведении экспериментальных исследований модель размещалась на упругих подвесах, позволяющих воспроизводить первую собственную частоту колебаний. В результате проведенных исследований получено семейство кривых, позволяющее установить зависимости амплитуды колебаний от массы (при постоянной частоте) и коэффициента демпфирования. Показано, что варьирование параметров конструкции может оказывать существенное влияние как на значения амплитуд колебаний, так

и на диапазон скоростей, в котором колебания наблюдаются.

РАСЧЕТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДЗЕМНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНО- СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

В.М. Серяков, д-р техн. наук, профессор

(ИГД СО РАН, г. Новосибирск)

Особенностью строительства подземных сооружений, тоннелей, станций метрополитенов является то обстоятельство, что горно-строительные работы ведутся в породном массиве, находящемся в исходном напряженном состоянии. Это накладывает особенности на постановки и методы решения задач о расчете напряженно-деформированного состояния, как самого породного массива, так и элементов, возводимых в нем конструкций.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что даже в условиях упругого деформирования элементов конструкций их напряженное состояние зависит от последовательности горно-строительных работ. При ведении горных работ на значительных глубинах, в условиях действия в массиве исходных тектонических усилий напряжения, возникающие в элементах конструкций и в породном массиве могут превысить пределы упругости.

Проведена модернизация метода расчета напряженно-деформированного состояния элементов подземных конструкций, учитывающего последовательность горно-строительных работ, для его применения в условиях упругопластического деформирования материалов конструкций и породного массива.

Приведен пример расчета напряженного состояния элементов крепи и массива горных пород, при последовательном возведении крепи в двух параллельных тоннелях.

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРАХ ВЫВАЛОВ ПОРОД В КРОВЛЕ И ПОЧВЕ ВЫРАБОТКИ

А.А. Красновский, канд. физ.-мат. наук

(ИГД СО РАН, г. Новосибирск)

Часто подземные подготовительные и очистные горные работы ведутся в породах, имеющих низкие прочностные характеристики. Через непродолжительное время после крепления выработок в их кровле начинается процесс интенсивного разрушения горных пород. Процесс работы крепи в таких условиях нуждается в дополнительном исследовании, которое, прежде всего, состоит в рассмотрении напряженно-деформированного состояния механической системы «крепь-окружающие породы».

В работе представлены постановка задачи и результаты исследования напряженного состояния крепи и массива, окружающего выработку, проводимую в породах с низкими значениями пределов прочности на разрушение. Обсуждены особенности выполнения геомеханических расчетов в неоднородной сплошной среде, имеющей значительную разницу механических свойств и геометрических размеров. Установлен характер деформирования крепи при заполнении пустот, образовавшихся при разрушении пород в кровле и бортах выработки, вспенивающимися фенольными смолами. Расчеты напряженно-деформированного состояния крепи и породного массива выполнены для трех горнотехнических ситуаций: крепь, возведенная сплошном массиве горных пород; крепь, работающая при наличии области, заполненной фенольными смолами, в кровле выработки; крепь, работающая при заполнении фенольными смолами бортов и кровли выработки. Полученные результаты расчетов позволяют дать предварительную оценку напряженного состояния крепи и выделить его основные особенности.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.В. Мищенко, д-р техн. наук, заведующий кафедрой ОПД

**(Новосибирское высшее военное командное училище,
г. Новосибирск)**

Для определения рациональной конфигурации структурно-неоднородной пространственной стержневой системы использован критерий минимума потенциальной энергии деформации системы $W \rightarrow \min$. Вариационная задача поиска геометрических функций $g_i(x_j)$ размеров поперечных сечений сведена к задаче нелинейного математического программирования с функцией Лагранжа

$$L(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \int_{l_j} \mathbf{S}_j^T \boldsymbol{\varepsilon}_j dx_j + \lambda_0 (\mathbf{R} \mathbf{Z} + \mathbf{R}_\Sigma) + \sum_{j=1}^g \lambda_j \varphi_j.$$

Решение строится на основе двухэтапного итерационного алгоритма, содержащего процедуры прямого и оптимизационного расчетов. Приведены результаты решения задач оптимизации: размеров поперечных сечений неоднородной рамы и координат крепления ярусов оттяжек пространственной мачтовой системы.

Применение интегрального энергетического критерия позволяет выявить рациональную конфигурацию системы с точностью до принятых амплитудных значений жесткостей, нагрузок и абсолютных значений поперечных размеров. Для их нахождения на заключительном этапе необходимо выполнить проектный расчет с привлечением необходимых расчетных критериев.

В число варьируемых параметров конфигурации могут быть включены: размеры поперечных сечений, характеристики опорных устройств (жесткости, эксцентриситеты), физические характеристики материалов в неоднородных системах. По единой схеме могут быть выполнены постановки задач с полным и частичным учетом видов деформации.

ВНЕДРЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕТОД ФОТОУПРУГОСТИ

М.В. Табанюхова, канд. техн. наук, доцент

(НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск)

Метод фотоупругости – один из методов экспериментальной механики. Его применяют для изучения напряжённого состояния плоских элементов. Использование метода фотоупругости предполагает проведение исследований с помощью прозрачных моделей. Материал, из которого их изготавливают, должен удовлетворять ряду требований. Одно из основных требований – он должен быть оптически чувствительным. Что касается процесса изготовления моделей, то высока вероятность того, что во время механической обработки в результате нагрева в местах соприкосновения режущих элементов с деталью в материале возникнут остаточные напряжения. Этого нельзя допустить, так как ещё одним из требований, предъявляемых к материалу модели, является отсутствие остаточных напряжений в нём. В связи с вышеперечисленным хотелось бы, с одной стороны найти новые пьезооптические материалы, ранее неизвестные, а с другой стороны, найти способ изготовления моделей сложной конфигурации, который не приводит к образованию остаточных напряжений. Внедрение аддитивных технологий в метод фотоупругости позволяет достигнуть обе цели. Для их реализации были испытаны с помощью установки ППУ-7 тестовые образцы из различных прозрачных материалов, используемых в объёмной печати. Определён круг новых пьезооптически чувствительных материалов, не используемых ранее в методе фотоупругости. В ходе тарировочных испытаний была выявлена проблема остаточных напряжений, возникновение которых обусловлено техникой печати. Рассмотрены несколько технологий и техник печати на различных 3-D принтерах с целью выявления оптимальной с точки зрения отсутствия остаточных напряжений. Найдены

новые материалы, обладающие высокой оптической чувствительностью и определена технология изготовления моделей, наиболее приемлемая для метода фотоупругости.

ВОЗМОЖНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСИЛИЙ В ОБДЕЛКЕ ТОННЕЛЯ

Л.Е. Казанов, аспирант-стажер

А.О. Кузнецов, канд. техн. наук, доцент

П.Г. Суровин, канд. техн. наук, доцент

(СГУПС, Г. Новосибирск)

В работе рассмотрена возможная методика оценки напряженно-деформированного состояния обделки тоннеля кругового очертания.

Предполагается, что по измерениям длин хорд между реперными точками на обделке, полученными методами маркшейдерской съемки, вычисляются проекции перемещения реперов на оси декартовой системы координат. После этого вычисляются перемещения в естественной системе координат, которая связана с осью обделки. Одна ось есть касательная к оси, а вторая – нормаль к ней.

После того, как получены перемещения в естественной системе координат можно получить аппроксимирующие функции для этих перемещений. Этими функциями могут быть, например, сплайны вида

$$u(s) = \sum c_i^{(u)} f_i(s). \quad (1)$$

Для проверки предлагаемой методики был выполнен модельный расчет. Использовались перемещения, вычисленные методом конечных элементов с использованием программного комплекса Midas GTS NX.

Для нахождения внутренних усилий по известным перемещениям использовались соотношения, приведенные в работе. Например, изгибающий момент представлен следующей зависимостью:

$$M = - \left[\frac{d^2 v}{ds^2} + \frac{d}{ds} \left(\frac{u}{\rho} \right) \right] EJ. \quad (2)$$

Расчет показал, что при аппроксимации перемещений кубическим сплайном по 6-и реперным точкам, изгибающие

моменты вычисляются с погрешностью $\sim 20\%$.

ОЦЕНКА РИСКА АВАРИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ ПОСТРОЕНИЯ «ДЕРЕВА ОТКАЗОВ»

Д.В. Зенченкова, канд. техн. наук, доцент

(ПГУПС, г. Санкт-Петербург)

В докладе рассматривается методика анализа оценки риска аварий зданий и сооружений как системы. Необходимость учета разнообразной по характеру и полноте исходной информации, а также большое разнообразие условий эксплуатации объектов, существенно затрудняют процедуру анализа и оценки риска сооружений. Для уникальных сооружений ввиду недостатка статистических данных об отказах для оценки риска аварии целесообразен графоаналитический метод построения «дерева отказов».

«Дерево отказов» - логическая схема, в которой анализируется взаимодействие элементов системы, отказ которых может привести к отказу системы в целом. При построении «дерева отказов» пользуются дедуктивным методом определения факторов, которые могут привести к так называемому головному событию, отказу системы. В «дереве отказов» иллюстрируется взаимодействие элементов системы, отказ которых в сочетании или по отдельности содействует с определенной вероятностью отказу системы в целом. При возможности численного определения вероятности базовых отказов, «дерево отказов» может быть решено, т. е. найдена вероятность реализации отказа системы. При решении «дерева отказов» возможно определить вероятность реализации каждой ветви «дерева отказов», что позволяет определить наиболее существенные факторы, увеличивающие риск аварии системы в целом. В докладе предложены формулы для численной оценки вероятности отказа системы с учетом корреляционной зависимости между отказами ее элементов.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БАЛОК МОЛОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕБРИСТОГО ПЕРЕКРЫТИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПОЛКИ ПЛИТЫ В РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ

К.А. Назарова

(СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург)

Ребристые перекрытия получили большое распространение за счет отсутствия бетона в растянутой зоне, где растягивающие усилия воспринимает полностью арматура. Однако расчет монолитного ребристого перекрытия по современным нормам может привести к существенному переармированию, поскольку арматура плиты также участвует в работе балки.

Такое влияние особенно заметно в работе консольных участков монолитного ребристого перекрытия, где плита находится полностью в растянутой зоне. Был проведен сравнительный анализ расчетов балки перекрытия с учетом влияния растянутой арматуры полки плиты и по современным нормам.

Включение растянутой арматуры полки произойдет при появлении трещин. Для определения эффективной ширины полки, которая будет включаться в работу, была построена и рассчитана численная модель.

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНЫ НА ВЯЗКОУПРУГОМ ОСНОВАНИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОДВИЖНОЙ ПОДРЕССОРЕННОЙ НАГРУЗКИ

А.И. Круссер, аспирант

(ВГТУ, г. Воронеж)

Изучение задач взаимодействия автомобиля с дорожным полотном или самолета с покрытием взлетно-посадочной полосы в настоящее время получает все более широкое распространение. Для моделирования такой системы транспортное средство обычно представляют в виде движущегося осциллятора, т.е. учитывают инерционные свойства и жесткостные характеристики перемещающегося объекта [1].

В настоящей работе исследуются нелинейные колебания прямоугольной свободно опертой пластины под действием подвижной подрессоренной нагрузки, опирающейся на вязкоупругое основание, для случая внутреннего резонанса один-к-одному, сопровождаемого внешним резонансом. Для описания демпфирующих свойств вязкоупругого основания типа Винклера применяется модель стандартного линейного твердого тела с дробной производной [2]. Определяющие уравнения решаются методом многих временных масштабов в сочетании с методом разложения дробной производной в ряд Тейлора. Полученные выражения для амплитуд и фаз нелинейных вынужденных колебаний системы исследуются на численном примере.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00443.

[1] Fryba L. Vibration of solids and structures under moving loads. Default Book Series, 1999.

[2] Rossikhin Yu. A. and Shitikova M. V. Application of fractional calculus for dynamic problems of solid mechanics: Novel trends and recent results. Appl. Mech. Rev. 63 (2010), 010801.

ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

М.Г. Петров, доцент, ведущий научный сотрудник

(СибНИА им. С.А. Чаплыгина, г. Новосибирск)

Обычным способом исследования поведения технических систем является анализ их выходных характеристик при заданных входных воздействиях. Это касается как материалов или конструкций, испытываемых на стендах, так и натурных конструкций при эксплуатационных нагрузках.

Состояние материала или конструкции оценивается по связи между выходным и входным воздействиями. При испытаниях, например, задаются какие-либо регулярные воздействия и анализируются связи между усилиями и перемещениями (или напряжениями и деформациями), по изменениям которых судят о состоянии объекта испытаний. При эксплуатации конструкций разумно использовать в качестве входного процесса тот, который можно и удобно измерить, не нарушая ход их эксплуатации.

Композиционный материал (КМ), являющийся одновременно материалом и конструкцией, демонстрирует особенности своего поведения, связанные с тем, что при растяжении и сжатии ведёт себя как два различных материала. Исследования процесса разрушения на том или другом типе образцов–представителей КМ подразумевают, понятно, исследования данной конкретной конструкции, отличающейся от другой, например, натурной конструкции, изготовленной из того же материала.

На примере диагностики КМ, основанной на анализе связей между усилиями и перемещениями, рассматриваются изменения их деформационных характеристик, соответствующих исходному состоянию объекта испытаний, и в связи с появляющимися в них повреждениями или изменениями свойств связующего. Иллюстрируются связи между неупругими деформациями КМ и их усталостной долговечностью,

изменения которых могут быть связаны с климатическими воздействиями на материал.

Для расчётных оценок ресурсных материалов и конструкций, находящихся в том или ином состоянии, применяются математические модели, построенные на уравнениях физической кинетики, в основе которых заложен термодинамический подход к течению и разрушению твёрдых тел.

Для конструкций, чьё состояние необходимо отслеживать в эксплуатации, анализируется изменение связи между входными спектрами усилий или перемещений и спектрами перемещений или ускорений в их характерных точках. Поскольку процессы внешних воздействий являются нестационарными, применяется вейвлет-преобразование реализаций входных и выходных воздействий с усреднением спектров по времени и частоте на характерных отрезках времени эксплуатации.

РАЦИОНАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ НДС И МЕХАНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

В.Г. Себешев, канд. техн. наук, профессор

(НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск)

Общепринятый подход в расчетах механической надежности строительных систем (сооружений, конструкций) состоит в использовании обобщенной вероятностной характеристики – резерва работоспособности S , определяемого как разность сопротивления R (resistance) и нагрузочного фактора Q (load effect) [1, 2]. Необходимый для оценки надежности P_s или вероятности отказа $P_f = 1 - P_s$ безразмерный параметр β – индекс надежности (reliability index) определяется как

$$\beta = \bar{S}/\hat{S} = 1/A_S = (1 - \xi) \left[A_R^2 + (\xi A_Q)^2 - 2r_{QR}\xi A_Q A_R \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $\xi = \bar{Q}/\bar{R}$; $A_S = \hat{S}/S$, $A_R = \hat{R}/\bar{R}$, $A_Q = \hat{Q}/\bar{Q}$ – коэффициенты вариации; $\bar{S}, \bar{Q}, \bar{R}$ – математические ожидания; $\hat{S}, \hat{Q}, \hat{R}$ – стандарты; r_{QR} – индекс корреляции Q и R .

Случайные величины Q и R в общем случае являются функциями элементов соответствующих векторов стохастических входных параметров $\{X_Q\}$ и $\{X_R\}$. Стандарты $\hat{Q}$ и $\hat{R}$ с хорошей точностью вычисляются методом статистической линеаризации (МСЛ), требующим аналитического или численного отыскания производных Q и R по элементам $\{X_Q\}$ и $\{X_R\}$, что в многопараметрических задачах может быть трудоемким.

Для упрощения вероятностных расчетов, выявляющих стохастические характеристики параметров системы и ее напряженно-деформированного состояния, через которые выражаются основные величины Q и R , предлагается, осуществив дефрагментацию расчетных процедур, на каждом этапе выделять в формулах и уравнениях состояния случайные комплексы видов

$$y = \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{и} \quad z = \prod_{i=1}^n z_i^{q_i}, \quad (2)$$

$$\text{где } y_i = \prod_{j=1}^m a_{ij} x_j^{k_{ij}}; z_i = \sum_{j=1}^m b_{ij} x_j^{d_{ij}};$$

$q_i, a_{ij}, b_{ij}, k_{ij}, d_{ij}$ – константы; x_j ($j = \overline{1, m}$) – входные параметры.

Коэффициенты вариации y и z находятся по МСЛ как

$$A_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\alpha_i A_{yi})^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{s=i+1}^n \alpha_i \alpha_s r_{y,is} A_{yi} A_{ys}}; \alpha_i = \frac{\bar{y}_i}{\bar{y}}; \quad (3)$$

$$A_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i A_{zi})^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{s=i+1}^n q_i q_s r_{z,is} A_{zi} A_{zs}}, \quad (4)$$

коэффициенты A_{yi} и A_{zi} – аналогично (4) и (3); индексы парной корреляции $r_{y,is}$ и $r_{z,is}$ рассчитываются по [3].

Использование полученных выражений A_y и A_z позволяет исключить операции нахождения производных и вследствие этого экономить вычислительные ресурсы.

Представленная методика, совместно с обезразмериванием случайных расчетных параметров, эффективна в решениях как прямых, так и обратных (проектных) задач расчетов надежности сооружений и конструкций, в том числе по поликритериальным и обобщенным условиям безотказности [4].

Приведены примеры реализации методики.

Список литературы

1. *Vrouwenvelder T.* Treatment of risk and reliability in the Eurocodes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 2008, Vol. 161, issue SB4 (August), P. 209 – 214.
2. *Ведяков И.И., Райзер В.Д.* Надежность строительных конструкций. Теория и расчет. М.: Изд-во АСВ, 2018. 414 с.
3. *Себешев В.Г., Кориунов И.С.* Определение характеристик взаимной корреляции расчетных параметров строительных систем для вероятностных расчетов и оценок надежности. В сборнике: Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные вопросы архитектуры и строительства". 2018. С. 23-29.
4. *Себешев В.Г.* Расчет надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безотказности // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2017. № 1 (т.14). С. 165 – 174.