

УДК 624.046

д.т. н., професор Усаковский С.Б.,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрены инженерные задачи, в которых вероятностные методы теории надежности (в частности, показатель надежности конструкции) использованы как инструменты исследования.

Основными задачами теории надежности являются разработка методов определения вероятности безотказной работы конструкции – показателя надежности P и обоснование рационального уровня этого показателя. В данной же работе в основном рассмотрены инженерные задачи, в которых показатель надежности использован как инструмент исследования. Мир строительных конструкций вероятностный, поскольку многие факторы строительства суть величины изменчивые. Поэтому подход к инженерным задачам с вероятностных позиций теории надежности может оказаться полезным.

1. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Итак, прикладной задачей теории надежности будем здесь называть инженерную задачу, в которой показатель надежности используется в качестве инструмента исследования.

1.1. Обобщенная модель надежности по А.Р.Ржаницыну, ее достоинства и недостатки.

В прикладных задачах рационально использовать модель оценки надежности, предложенную основоположником теории надежности конструкций профессором Алексеем Руфовичем Ржаницыным [1]. Характеристика безопасности γ по А.Р.Ржаницыну определяется следующим образом

$$\gamma = \frac{\xi - 1}{\sqrt{A_R^2 \cdot \xi^2 + A_Q^2}} \quad (1)$$

Здесь ξ – коэффициент запаса, он равен отношению средних значений обобщенной прочности \bar{R} и обобщенного внешнего воздействия \bar{Q} : $\xi = \frac{\bar{R}}{\bar{Q}}$.

A_R и A_Q – коэффициенты вариации (изменчивости) величин \tilde{R} и \tilde{Q} ; A_R и A_Q учитывают изменчивость C_v всех действующих факторов.

Определив характеристику безопасности γ , можно по таблицам функции Лапласа перейти к оценке надежности конструкции P , которая показывает вероятность безотказной работы конструкции.

В модели А.Р.Ржаницына изменчивые характеристики обобщены: A_R зависит от изменчивости прочности материалов (в случае фундаментов – от изменчивости грунтов), A_Q зависит от изменчивости постоянных и временных нагрузок.

Главное достоинство этой модели – ее простота и связь с детерминированным методом расчета. Коэффициент запаса ξ здесь определяется детерминированным методом. Его можно вычислить «собрать» все расчетные коэффициенты метода предельных состояний, заложенные в нормы проектирования.

Некоторые коэффициенты вариации C_v , входящие в A_R и A_Q , можно определить расшифровкой норм. Так коэффициент надежности постоянных нагрузок γ_f часто равен 1.1, в то время как $C_v=0,033$ (т.е. γ_f гарантирует отступление от среднего значения нагрузки на три стандарта). Изменчивость других факторов можно определить, используя техническую литературу.

Модель наглядно демонстрирует идею создания резервов прочности конструкции: запасы прочности конструкции ξ созданы для того, чтобы изменчивость действующих факторов A_R и A_Q не вывела конструкцию в недопустимую область.

Недостатки модели. Модель предполагает, что все действующие случайные факторы независимы и подчинены нормальному закону, а это не всегда так. Поэтому такие оценки надежности часто приближенны. Сопоставление таких оценок (например, сопоставление P_1 и P_2 , для данной конструкции при действии устаревшей и новой нагрузок) уменьшает (точнее, «сглаживает») такую неточность.

Модель (1) получена А.Р.Ржаницыным из выражения

$$\gamma = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

путем деления числителя и знаменателя на \bar{Q} . Для некоторых прикладных задач имеет смысл показать все действующие изменчивые факторы, расписав значения σ_R и σ_Q . Тогда

$$\gamma = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Q}{\partial y_1} \cdot \sigma_{y_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial y_2} \cdot \sigma_{y_2}\right)^2 + \dots}} \quad (2)$$

Численная величина частного стандарта в знаменателе показывает здесь относительную роль изменчивости случайного фактора x_i или y_i .

1.2. Какова надежность конструкций, запроектированных по действующим нормам проектирования сооружений.

Метод предельных состояний, положенный в основу норм, неявно определяет надежность конструкции. Однако при этом неявно определяется не конкретное значение, а диапазон приемлемых значений надежности. Происходит это следующим образом. Система расчетных коэффициентов норм обеспечивает определенный коэффициент запаса $\xi = \frac{\bar{R}}{\bar{Q}}$, который можно вычислить «собрав» все эти коэффициенты. Даже у сходных конструкций коэффициенты запаса могут отличаться. Так для пролетных строений мостов доля подвижной нагрузки падает с ростом пролетов, коэффициент надежности по нагрузке γ_f для подвижной нагрузки выше, чем для постоянной. Поэтому, чем меньше длина пролета, тем больше «вес» подвижной нагрузки a , значит, больше коэффициент запаса, хотя это различие не столь уж велико.

Для оценки надежности по (1) необходимо еще знать и коэффициенты вариации C_v всех действующих факторов (это прочность материалов, нагрузки). Таких данных о C_v в нормах нет. Реальность такова, что приемлемые значения изменчивости этих факторов находятся в некотором диапазоне. Примерные значения C_v : для прочности бетона $C_v \approx 0,10 \div 0,12$, для прочности стали $C_v \approx 0,06 \div 0,08$. Поэтому и оценку надежности конструкции, используя модель А.Р.Ржаницына, можно определить в виде диапазона приемлемых значений.

Здесь автор привел значения C_v при сравнительно высокой культуре строительного производства. В реальной жизни C_v могут быть больше. Так для прочности бетона коэффициенты вариации могут быть и 16% и 18%, что нельзя приветствовать.

Вывод: нормы неявно задают надежность конструкции в виде коридора с размытыми границами. Для железобетонных балок диапазон R часто может быть: $0,9995 \div 0,9999$. Для несущей способности свай по грунту диапазон R может быть $0,995 \div 0,999$.

Обращение к составителям норм. Желательно указывать в нормах

статистические характеристики величин нагрузок, прочности материалов хотя бы в качестве ориентиров.

1.3. Оценка резервов прочности существующих конструкций массового строительства в условиях дефицита информации.

Потребность в оценке прочности конструкций массового строительства (например, изготовленных по типовым проектам) может возникнуть, когда увеличиваются нагрузки на эти конструкции, и нет возможности произвести такую оценку для каждой конкретной конструкции в отдельности.

Такая ситуация имела место в восьмидесятые годы прошлого столетия, когда были введены новые нормы проектирования мостов.

Теперь такая задача актуальна для фундаментов существующих мостов небольших пролетов, построенных под устаревшие нагрузки. Подвижные нагрузки на эти мосты согласно действующим нормам ДБН В.1.2-5.2009 существенно увеличены.

Задача такого типа возникает и при реконструкции пятиэтажных жилых зданий путем достройки новых этажей.

Итак, известны устаревшие нормы, по которым в свое время были рассчитаны конструкции, и новые действующие нормы, в которых нагрузка увеличена. Требуется оценить ситуацию в целом для массива однотипных (но не одинаковых) конструкций.

Идейный каркас предложенного метода заключается в следующем.

1. Рассматриваются конструкции, рассчитанные методом предельных состояний в соответствии с действующими на период строительства нормами. Следовательно, можно на основе этих норм определить коэффициент запаса ξ , собрав все коэффициенты метода предельных состояний.

2. Новые нормы (новая нагрузка, новая реальность) уменьшают этот коэффициент запаса, который тоже можно определить.

3. Для оценки резервов прочности конструкции следует перейти к вероятностным методам теории надежности и использовать при этом сравнительно простую модель А.Р.Ржаницына. В этой модели, кроме коэффициента запаса, следует знать C_v – коэффициенты вариации действующих факторов. Эти коэффициенты легче определить, чем конкретные значения параметров конструкции.

4. Предлагается вводить в модель не одно значение C_v , а диапазон реальных значений C_v : $C_{v1} \div C_{v2}$, характеризующий данный изменчивый фактор. Поэтому в результате получим диапазон значений показателя надежности $P_1 \div P_2$.

5. Сопоставление пар показателей надежности $P_1 - P_2$ (одна пара $P_1 - P_2$

получена при старом коэффициенте запаса, другая при новом) и характеризует изменение надежности конструкции.

6. Данная задача решается в условиях неопределенности: многие факторы конструкций не известны. Однако в наших расчетах неявно присутствует инженер, который имел доступ ко всем необходимым факторам и использовал их при проектировании конструкций в соответствии с действующими на тот период нормами. Его квалификация и обеспечивает потребный на тот период времени коэффициент запаса.

7. Износ конструкции также может быть учтен путем соответствующей корректировки коэффициента запаса.

8. Предполагаемый метод полезен прежде всего для массовых конструкций. Пусть, например, $P=0,98$. Трактовка результата может быть такова: из 100 однотипных конструкций 2 конструкции дадут отказы. Какие это конструкции конкретно, метод не дает ответа. Однако и для оценки резервов единичной конкретной конструкции предлагаемый подход полезен, поскольку дает ориентир инженеру.

1.4. О контроле надежности конструкций в процессе строительства.

Использование резервов надежности.

Расчет по методу предельных состояний обеспечивает определенные запасы прочности в конструкциях. Эти запасы во многом вызваны изменчивостью факторов строительства C_v (прочность материалов, нагрузки). Повышение культуры строительства, ведущее к уменьшению изменчивости действующих факторов и повышению надежности, позволяет использовать часть полученных таким образом резервов. Предлагается в процессе строительства производить контроль за изменчивостью прочностных характеристик материалов, при этом оценивать показатель надежности конструкции и изымать часть резервов. Прежний, неявно определяемый нормами показатель надежности конструкции, должен быть обеспечен. Ниже приведены этапы предложенного подхода.

– Строительная организация должна обладать более высокой культурой, чем в среднем по отрасли. Это значит, что и коэффициенты вариации C_v действующих факторов здесь меньше, чем в среднем по стране на предприятиях с достаточным уровнем культуры производства.

– Для данной конструкции необходимо построить модели надежности ее элементов.

– Для случайных факторов этих моделей определить их изменчивость в целом по отрасли. Здесь присутствует определенная трудность: нормы часто не

регламентируют C_v . Приходится ориентироваться на данные технических источников.

– Вычислить показатель надежности P , который неявно требуют нормы проектирования конструкций данного типа.

– Использовать полученные дополнительные резервы можно следующим образом.

1. Уменьшить сечение конструкции, обеспечивая при этом требуемый нормами уровень P .

2. Не изменяя сечений, использовать повышенные резервы. Например, в мостах уширить габарит проезжей части, опять-таки обеспечивая требуемый нормами уровень надежности P .

Статистические данные о прочности грунтов и материалов конструкции будут полезны в дальнейшем, например, при реконструкции сооружения. Эти данные следует зафиксировать и сохранить.

1.5. О соотношении надежности отдельных элементов сооружения.

Данный вопрос изучен в меньшей степени. По-видимому, это соотношение должно быть рациональным, исходя из инженерных соображений. Так надежность фундаментов скорее должна быть выше надежности надфундаментной части: производить усиление фундаментов сложнее. Однако, во-первых, это не всегда выполнимо, и во-вторых, мало кто из проектировщиков озабочен этим вопросом: проектировщику достаточно выполнить требование соответствующих норм. А в нормах этот вопрос не рассматривается.

Для изучения данного вопроса предлагаем следующий план действий.

1. Для начала полезно оценить показатели надежности основных элементов конкретной конструкции и сопоставить их.

2. Выявить иерархию определяющих расчетов данной конструкции и сопоставить с иерархией показателей надежности. По-видимому, здесь должно быть соответствие.

3. Если нет рациональной иерархии в уровнях надежности, то, возможно, предстоит нелегкая задача преодоления ведомственных барьеров.

Рассматриваемой задачей близок вопрос и об уровне точности расчетов различных элементов конструкции. Неточность детерминированных расчетных моделей влечет и неточность оценок надежности. Там, где аналитические методы оценки несущей способности неточны, на практике используют натурные испытания. Например, пробная бойка свай: это и мера повышения надежности.

В качестве примера нами были рассмотрены запасы прочности днепровского склона и железобетонного сооружения (жилого дома) на этом склоне. Оценка надежности железобетонных конструкций по прочности: примерно $P = 0,9999$, оценка надежности устойчивости склона может быть на порядок ниже: $P \approx 0,997 \div 0,998$. Железобетонную, а также стальную, каменную конструкцию легко усилить на стадии проектирования, увеличив сечения. Для увеличения же устойчивости против сдвига масштабного склона приходится изменять рельеф (срезка грунта вверху склона, подсыпка грунта внизу) либо прорезать толщу грунтов сваями, выходя на более прочные глубинные горизонты, все это затратно.

Вопросы, затронутые в этом разделе, еще ждут своих исследователей и нуждаются в дальнейшей проработке.

2. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НЕТОЧНОСТИ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА И НЕПОЛНОТЫ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ ЭТОЙ МОДЕЛИ

2.1. Учет в модели надежности погрешности расчетного метода Δ и неполноты исходной информации δ .

В модель для оценки надежности конструкции, кроме традиционно учитываемых случайных факторов, таких как прочность материалов, величины нагрузки, предложено ввести дополнительно еще два случайных фактора, учитывающих неточность расчетного метода и неполноту исходной информации. Подробнее об этом – в монографии автора [2].

Неточность расчетного метода учитывается посредством величины Δ – относительной погрешности расчетного метода для ансамбля однотипных конструкций.

Пусть для совокупности однотипных (но не одинаковых) конструкций – ансамбля конструкций существует менее точный метод расчета (расчетная модель) Φ и более точный Φ_1 . Результаты расчетов по этим методам также назовем соответственно Φ и Φ_1 . Заметим, что Φ_1 может быть и результатом достаточно точного эксперимента. Относительной погрешностью расчетного метода предложено назвать величину Δ .

$$\Delta = (\Phi_1 - \Phi)/\Phi \quad (3)$$

Из (1) следует, что более точное значение Φ_1 равно:

$$\Phi_1 = \Phi(1+\Delta) \quad (4)$$

Для ансамбля конструкций может быть найдено множество значений Δ , подсчитанных по формуле (3). Все эти значения Δ в общем случае будут отличаться друг от друга и в то же время группироваться относительно некоторого значения, называемого средним. То есть для ансамбля конструкций Δ будет вести себя, как случайная величина. Относительной погрешностью расчетного метода для ансамбля конструкций будем называть случайную величину $\tilde{\Delta}$, реализациями которой являются значения $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_i$, определенные по (3) для ряда конструкций данного ансамбля. Таким образом, генеральной совокупностью для случайной величины Δ является множество значений относительной погрешности Δ , найденных для всех мыслимых конструкций данного ансамбля.

Статистическое описание фактора неполноты информации основано на следующем. В обычных (детерминированных) расчетах конструкции часто используются выборочные характеристики, например, выборочное среднее \hat{x} . Его изменчивость тем больше, чем меньше число членов выборки. Так стандарт выборочного среднего $\sigma_{\hat{x}}$ зависит от числа членов выборки n : $\sigma_{\hat{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$, где σ_x – стандарт (среднее квадратическое отклонение) величины \hat{x} .

Поэтому предложено изменчивость выборочных характеристик связывать с неполнотой исходной информации и в модели по оценке надежности выделять член δ_j , зависящий от изменчивости выборочных характеристик, например, от централизованного выборочного среднего \hat{x}° : $\delta_j = f(\hat{x}^\circ)$. При использовании методов линеаризации $\delta_j = \frac{\partial \Psi}{\partial \hat{x}} \hat{x}^\circ$. Выражение для оценки надежности с учетом неполноты информации о факторе x имеет вид: $P = p[\Psi(\delta_j) > 0]$, а при использовании метода линеаризации $P = p[\Psi + (\delta_j) > 0]$, где $\Psi = R - Q$.

Детально задача оценки надежности конструкции с учетом $\tilde{\Delta}$ и $\tilde{\delta}$ рассмотрена в монографии [2].

2.2. Оценка неопределенных факторов на основе уравнений равнонадежности.

Предложенная для оценки надежности модель учитывает такие изменчивые, и значит, неопределенные факторы, как нагрузки, прочность материалов, неточность расчетной модели и неполноту исходной информации и такие определенные, как размеры конструкции, среднее значение обобщенной прочности \bar{R} . Предлагается в рамках такой модели сопоставить эти

факторы и оценивать фактор неопределенный посредством фактора более определенного [2]. При этом используется принцип равнонадежности, т.е. сравниваются варианты конструкции с одинаковой надежностью:

$$p(\Psi + \delta^\circ > 0) = p(\Psi - \frac{\Delta_R}{R} R > 0) \quad (5)$$

Левая часть (5) – это оценка надежности конструкции с учетом неточности расчетного метода. (Здесь для простоты рассмотрен случай, когда $\bar{\Delta} = 0$, $\sigma_{\Delta} \neq 0$ и $\bar{\delta}$, где $\bar{\delta} = \bar{R} \cdot \bar{\Delta}$, является центрированной случайной величиной δ°). В правой части (5) рассмотрена надежность той же конструкции, при расчете которой неточность расчета устранена. При этом для того, чтобы вернуться к прежнему уровню надежности, резерв прочности уменьшен на величину $\frac{\Delta_R}{R} R$. Т.е. уравнение (5) можно истолковать следующим образом: случайный фактор неточности расчета (он учтен величиной δ°) так же понижает надежность, как и уменьшение обобщенной прочности на величину $\frac{\Delta_R}{R} R$. Предположим $\frac{\Delta_R}{R} = 0,10$. Это значит, что случайный фактор неточности понижает надежность конструкции так же, как и уменьшение ее несущей способности на 10%. И в этом смысле $\frac{\Delta_R}{R} R$ – это вероятностный критерий для оценки потерь неточности расчетов. Приведено обоснование такого критерия. Рассмотрены более общие аналитические модели; например, в случае, когда $\bar{\Delta} \neq 0$ [2].

$$p(\Psi + \delta > 0) = p(\Psi + \bar{\delta} - \Delta_R \cdot \bar{\Delta} - \frac{\Delta_R}{R} R > 0) \quad (6)$$

Здесь величина $\frac{\Delta_R}{R} R$ является оценкой потерь от случайно части неточности расчета, характеризующей роль поправки δ° . О роли $\bar{\delta}$ – постоянной части поправки к резерву прочности можно судить по отношению $\frac{\bar{\delta}}{\bar{R}} = \bar{\Delta}$. Полученные оценки потерь от неточности расчетов выражаются в единицах обобщенной прочности конструкции (т.е. на языке, удобном для инженерного анализа), их можно вычислить в объемах строительных материалов и затем получить оценки потерь и в денежном выражении.

На основе обобщенных аналитических моделей типа (5) и (6) получены уравнения для практической оценки потерь от неточности расчетной модели и неполноты исходной информации. В таких уравнениях применены различные способы оценки надежности конструкции: посредством характеристики безопасности γ , с использованием плотностей распределения случайных величин, с использованием метода условных функций надежности и учетом

фактора времени.

В (5) и (6) оценивается неточность расчетного метода (расчетной модели). Таким же образом можно оценить неполноту исходной информации, изменчивость действующей нагрузки или изменчивость прочности материала конструкции. Подробнее об этом в [2].

2.3. Роль изменчивых факторов в статически неопределимых системах.

Проанализируем особенности оценки надежности статически неопределимых систем. Расчет прочности таких систем, а также оценка их надежности P может производиться на основе классической схемы («упругая модель»), а также с использованием теории предельного равновесия. Показатель надежности P будет зависеть от того, что решено считать предельным состоянием системы: отказ по упругой модели или отказ последнего шарнира. Задача последовательности отказов здесь не рассматривается.

Подчеркнем, что для статически неопределимых систем (особенно для сложных много раз статически неопределимых) опасной может оказаться ситуация, которую здесь назовем «неоднородностью изменчивости» случайного фактора внутри конструкции. Речь идет о том, что характеристики изменчивости такого фактора могут изменяться в пределах элементов данной конструкции. А это может привести, например, при такой «неоднородной изменчивости» жесткости EF (EI) к изменению расчетной схемы сооружения: геометрия расчетной схемы останется прежней, а жесткость отдельных элементов случайным образом изменится. Другой пример: «неоднородность изменчивости» прочности материала может изменить места возникновения пластических шарниров при расчете по предельному равновесию.

Описанная выше «неоднородная изменчивость» может иметь место при бетонировании сооружения в разных температурных условиях, нарушении технологии кирпичной кладки и при других технологических нарушениях.

Примером опасного влияния фактора «неоднородной изменчивости» могут служить неоднородно изменчивые основания. Здесь существенная «неоднородность изменчивости» свойств грунта приводит к различным осадкам разных частей здания и в результате к трещинам в несущих стенах.

Поэтому в статически неопределимых системах следует проверять роль «неоднородной изменчивости». Причем это следует делать не только для выявления и оценки энтропийных факторов, но и для проверки жизнеспособности сооружения, т.е. для оценки «обычной прочности».

Если опасная ситуация «неоднородной изменчивости» снята, то роль изменчивых факторов можно оценивать, используя уравнения

равнонадежности. Ведь и в этом случае в уравнении $P_1 = P_2$ фигурируют обобщенная прочность R и обобщенная нагрузка Q , которые зависят от всех действующих факторов.

Итак, в статистически неопределимых системах прежде всего следует опасаться «неоднородной изменчивости», не допускать ее появления в процессе строительства.

2.4. Об эффективности новых расчетных моделей. Не всегда они эффективны.

Здесь с вероятностных позиций рассмотрены ситуации, которые возникают, когда существующие расчетные модели (расчетные методы) заменяются новыми более точными. Речь идет о детерминированных моделях.

Расчетные методы существуют для совокупности однотипных но не одинаковых конструкций. Неточность расчетного метода приводит к появлению систематической $\bar{\delta}$ и случайной δ° ошибок в рамках данного ансамбля конструкции $\tilde{\delta} = \bar{\delta} + \delta^\circ$. Подробнее об этом в [2]. Систематическая ошибка $\bar{\delta}$ неявно входит в реальный коэффициент запаса. Случайная ошибка δ° является безусловно отрицательным энтропийным фактором: ведя расчет конструкций данного ансамбля, мы каждый раз ошибаемся по иному. В модели надежности конструкций имеют место и другие случайные факторы: прочность материалов, нагрузки. Случайная ошибка расчетного метода, действуя вкупе с ними, создает неопределенность в поведении конструкции.

Рассмотрим ситуации, которые имеют место при внедрении новых более совершенных расчетных методов, вполне корректных с детерминированных позиций. Заметим, что расширенная модель А.Р.Ржаницына хорошо проясняет ситуацию: соотношение частных стандартов в этой модели и показывает роль каждого случайного фактора.

Благоприятный случай. До уточнения расчетного метода в модели надежности конструкции доминировал изменчивый фактор δ° , связанный с неточностью этого метода. Энтропия (неопределенность) этого фактора подавляется новым расчетным методом. Вероятностный подход с позиций теории надежности позволяет выявить здесь положительный эффект.

Бесполезное уточнение. В модели надежности конструкции доминировали изменчивые факторы, связанные с прочностью материалов \tilde{R} , величинами нагрузок \tilde{q} . Энтропия этих факторов была больше чем энтропия неточности прежней расчетной модели. Поэтому избавление от последней мало скажется на конечном результате. Фигурально говоря, уточнение расчетной модели «тонет» в неопределенности \tilde{R} и \tilde{q} . (Однако, если уменьшить эту неопределенность \tilde{R} и \tilde{q} , подняв культуру производства, то эффективность

уточнения расчета возрастет).

Изъятие запасов. Новый более совершенный метод расчета выявляет резервы прочности в конструкциях. В то же время энтропийная составляющая метода расчета остается прежней. В этом случае внедрение нового метода расчета без контроля с позиций теории надежности изымает запасы прочности и понижает надежность. Такая ситуация возможна, например, в статически неопределимых системах при учете пластических свойств материала и при использовании моделей предельного равновесия. Опасность может заключаться в том, что необходимая надежность сооружения возможно была определена предыдущей практикой проектирования и строительства, а новый метод расчета в данном случае эту надежность понижает.

На практике возможны сочетания указанных выше случаев. Поэтому для успешного внедрения нового расчетного метода желательно оценить ситуацию, построив вероятностную модель надежности сооружения. Об этой модели более подробно сказано в монографии [2] и разделе 3.2 настоящей работы.

2.5. Можно ли рассматривать относительную погрешность расчетного метода Δ как случайную величину.

Относительная погрешность расчетного метода Δ , как правило, величина изменчивая. Вопрос в том, обладает ли Δ статистической устойчивостью.

Свойство устойчивости случайных величин заключается в том, что «при большом числе опытов частота события приближается (точнее сходится по вероятности) к вероятности этого события» [Вентцель Е.С. Теория вероятностей]. Говоря не строго, исследователь так должен очертить границы ансамбля конструкций – АК, для которых определяет Δ , чтобы полученные значения $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_i$ сходились по вероятности к случайной величине $\tilde{\Delta}$ этого АК. То есть, практически не должно быть резких выбросов Δ в этом ансамбле конструкций.

Задача статистического описания Δ имеет как формально-статистический, так и содержательно-эвристический характер.

Требования математической статистики заключаются в рациональной организации выборки, выделении единицы отбора, осуществлении случайности отбора, а также в проведении других статистических процедур. В статистике существует критерий Вилкоксона, который оценивает однородность выборки, то есть гипотезу о принадлежности в данном случае значений Δ к одной генеральной совокупности.

Содержательная часть включает в себя анализ ситуации с позиций строительной механики и инженерного дела, следует проанализировать: каковы причины неточности расчета, для каких групп конструкций применяется

расчет, какую совокупность конструкций следует выделить для статистических исследований величины Δ . Здесь прежде всего требуется добиваться соответствия между конечной целью вероятностного исследования и границами генеральной совокупности исследуемых конструкций. Однако следует помнить, что «строгих математических методов, позволяющих точно определить, находимся ли мы в условиях статистического ансамбля, не существует: любая вероятностная модель, так же как и любая математическая модель вообще, есть лишь некоторое приближение к исследуемой реальной действительности» [4].

Далее авторы цитируемой книги «Прикладная статистика» [4] условно разделяют реальные ситуации на три вида.

1. Области высокой работоспособности вероятностно-статистических методов.
2. Допустимые области применения этих методов.
3. Недопустимые области.

По-видимому, многие факторы строительства, например, прочность материалов, нагрузки находятся во второй области, в лучшем случае на границе первой и второй. На основании вышеизложенного мы полагаем, что описание Δ как случайно величины так же правомерно, как и аналогичные описания других факторов строительства.

3. О НОВОЙ ПАРАДИГМЕ ТЕОРИИ РАСЧЕТА СООРУЖЕНИЙ

3.1. Новая задача теории расчета сооружений.

Теория расчета сооружений добилась в последние десятилетия значительных успехов; но эти успехи ведут ее, по нашему мнению, к кризису. Кризис этот заключается в разрыве между все более точными расчетными моделями и часто неопределенными (энтропийными) исходными данными. Здесь речь идет о данных инженерно-геологических изысканий, данных о прочности строительных материалов и величинах нагрузок; все они имеют случайную природу.

Качественно это выглядит так. Рассчитать можно практически любую конструкцию, а получить достаточно полные данные о грунтах основания, построить сооружение высокого качества с малым разбросом прочностных свойств материалов и с малым разбросом величин действующих нагрузок – гораздо труднее.

Количественно же это выражается в том, что в модели надежности конструкции часто превалирует изменчивость прочности материалов, изменчивость величины нагрузки, изменчивость же неточности расчетного

метода (расчетной модели) скромнее.

Выход из ситуации автор видит в том, что перед теорией сооружений как наукой должна быть поставлена новая задача.

Если прежняя задача теорий сооружений – это «усовершенствование, уточнение расчетных методов», то новая задача – это «находить в расчетах сооружений наиболее значимые энтропийные (т.е. неопределенные) факторы с целью их подавления».

Прежняя задача усовершенствования расчетных методов остается в силе как один из случаев подавления энтропии [3].

Сформулированную выше задачу теории расчета сооружений мы предлагаем положить в основу новой парадигмы.

3.2. Вероятностная разведка ситуации для выявления энтропийных факторов – важнейший метод новой парадигмы.

Предлагается новый вид деятельности в области теории расчета сооружений: выявление вероятностными методами энтропийных факторов на всех стадиях создания и жизни сооружения с целью их последующего подавления.

Подавлять в первую очередь следует факторы с наибольшей энтропией. В модели надежности эти случайные факторы имеют наиболее значимые величины частных стандартов, (т.е. средних квадратических отклонений). Напомним, что такая энтропия связана со случайным характером нагрузок и прочности материалов, а также и с неточностью расчетных моделей и неполнотой исходной информации.

Здесь удобна модель А.Р.Ржаницына в виде (2). В эту модель следует ввести факторы, связанные с неточностью расчетного метода и неполнотой исходной информации. Оценку потерь от влияния изменчивых факторов, неточности расчетной модели, неполноты информации можно производить на основе уравнений равнонадежности. Об этом сказано в разделе 2.2 а более подробно в монографии [2].

Если согласиться с вышесказанным, то могут быть поставлены задачи следующего типа.

Достаточен ли уровень исходной информации при проектировании промышленных и гражданских зданий, мостов, тоннелей, дорог, плотин? В полной ли мере требования нормативов (СНиПов России, ДБН Украины) отражают этот необходимый уровень. Достаточен ли уровень точности расчетных моделей, описывающих поведение конструкции? Надо ли соглашаться со значительным разбросом прочностных свойств материалов и значительным разбросом величин нагрузок? Эти задачи могут быть актуальны

как для различных отраслей строительства, так и для конкретного сооружения, которое проектируется в сложных условиях.

3.3. О концепции Томаса Куна, изложенной в его книге «Структура научных революций». Анализ предлагаемой парадигмы с позиций этой концепции.

Ситуацию, сложившуюся в теории сооружений, полезно рассмотреть с позиций концепции известного историка науки Т.Куна, изложенной в его книге [5].

Развитие науки по Томасу Куну идет не столько за счет накоплений знаний, сколько за счет революционных скачков. Зрелость науки определяется наличием парадигмы. Этому понятию Т.Кун дает следующее определение.

«Под парадигмами я подразумеваю признанные всеми научные достижения, которые в течении определенного времени дают научному обществу модель постановки проблем и их решения» [5, с. 11].

Т.е. парадигма – это некий канон, образец, которому следует научное сообщество в течении определенного, «нормального» по Т.Куну периода науки. «Ученые, научная деятельность которых строится на основе одинаковых парадигм, опираются на одни и те же правила и стандарты научной практики» [5, с. 29].

Итак, по Т.Куну «нормально» развитие науки идет в соответствии с общепринятой парадигмой: ученые «наводят порядок» в здании науки. Но вот начинают возникать «аномалии»: нарушаются «навешанные парадигмой ожидания, направляющие развитие нормальной науки» [5, с. 80].

Внимание к аномалиям обнаруживает кризис в науке, а кризис разрешается новым открытием и появлением новой парадигмы.

«Новая теория предполагает изменения в правилах, которыми руководились ученые в практике нормальной науки до этого времени Усвоение новой теории требует перестройки прежней и переоценки прежних факторов, внутреннего революционного процесса» [5, с. 24].

Новая парадигма по Т.Куну должна обладать двумя характеристиками:

1. Она должна быть достаточно нова («беспрецедентна»).
2. И достаточно открыта, чтобы новые поколения ученых могли в рамках новых воззрений найти для себя нерешенные проблемы [5, с. 80].

Далее следуют некоторые мысли Т.Куна.

Кризис в науке говорит о необходимости смены инструментов [5, с. 109].

Значительное место в концепции Т.Куна занимает процесс смены парадигмы. По сути, идет драматическая борьба старой и новой парадигм.

«Подобно выбору между конкурирующими политическими институтами,

выбор между конкурирующими парадигмами оказывается выбором между несовместимыми моделями жизни сообщества» (научного) [5, с. 130].

«Каждая группа использует свою собственную парадигму для аргументации в защиту этой парадигмы» [5, с. 130]. Т.е. имеет место «логический круг».

«Ни одна спорящая сторона не будет соглашаться со всеми неэмпирическими допущениями, которые другая сторона считает необходимыми для того, чтобы доказать свою правоту».

Убедительной может оказаться практика нового научного исследования, когда она позволяет решить проблемы, которые привели старую парадигму к кризису [5, с. 130, 131, 201].

Попытаемся оценить ситуацию в теории расчетов сооружений с позиций концепции Т.Куна.

Нельзя утверждать, что теория сооружений в настоящее время переживает кризис, ее развитие продолжается. Однако все же «аномалии» встречаются. Они заключаются в том, что в достаточно точные расчетные модели закладываются иногда сравнительно неопределенные исходные данные, а это приводит к неопределенности конечных результатов. Иногда при внедрении новых расчетных методов происходит неоправданное изъятие части запасов прочности.

Поэтому в перспективе старая парадигма с основной задачей: «Уточняй, усовершенствуй расчетные методы» может привести к кризису.

Причем кризис этот относится не к самой теории сооружений, а к возможности применения ее внутренне безупречных детерминированных результатов в реальном изменчивом мире строительных конструкций.

Достигнутая точность расчетных моделей становится в некоторых случаях:

- 1) малоэффективной;
- 2) бесполезной;
- 3) обманчивой и даже опасной, когда в результате применения новой модели изымаются запасы прочности.

Полагаем, что элементы «старения» действующей в настоящее время парадигмы проявляются и в следующем

- Спрос строительной отрасли, других отраслей на новые расчетные модели уже не тот, что был 30 – 40 лет назад.
- В диссертациях часто решаются экзотические задачи поведения конструкций в различных экстремальных условиях.
- Популярна задача усиления, реконструкции сооружений, подвергнувшихся износу, однако без учета вероятностного аспекта этой задачи.

– Идет уточнение, улучшение расчетных моделей, возможно, и так достаточно точных.

В то же время не происходит «подтягивания» недостаточной точности исходных данных к возросшей точности расчетных моделей.

Не ставится задача уменьшения разброса прочности материалов за счет повышения культуры производства.

Не поощряется более высокая культура производства передовых строительных организаций.

Не используются современные достижения автоматике для контроля за нагрузками, а это ведь один из методов подавления энтропии.

Эффективность новых расчетных моделей проверяется по старинке без привлечения вероятностного подхода к этой задаче.

Томас Кун утверждает: «Борьба между конкурирующими парадигмами – это выбор между несовместимыми моделями».

По нашему мнению, положение не столь драматично. Новая парадигма не отрицает старую, а расширяет поле деятельности. Старая задача «усовершенствуй расчетные методы» остается в силе как частный случай уменьшения неопределенности.

Вероятностные методы теории надежности, изложенные здесь и в работе [2], являясь разведкой ситуации, определяют области, в которых уточнение расчетных моделей наиболее эффективно, и указывают на энтропийные факторы, требующие подавления.

Налицо взаимодействие между старой и новой парадигмами.

Однако остается некоторое напряжение между вероятностным и детерминистским характером мышления специалистов, работающих в области теории сооружений. Исследователям, успешно развивающим детерминированные методы, к сожалению, трудно согласиться с тем, что эффективность использования предложенных ими расчетных моделей следует оценивать с вероятностных позиций теории надежности.

В следующем параграфе приведены основные положения предлагаемой парадигмы.

3.4. Основные положения новой парадигмы.

1. Перед теорией расчета сооружений как наукой должна быть поставлена новая задача – находить наиболее значимые энтропийные факторы с целью их подавления. Прежняя задача усовершенствования расчетных методов остается в силе как один из случаев подавления энтропии.
2. Теория расчетов сооружений остается в основном детерминированной

наукой. Вероятностные методы направлены на увеличение ее эффективности.

3. Вероятностная разведка ситуации для выявления энтропийных факторов является важнейшим методом новой парадигмы. При этом используются модели теории надежности.
4. Оценка эффективности нового и вполне корректного детерминированного расчетного метода – задача вероятностная. Ее решать следует с позиций теории надежности.

Автор полагает, что гипотеза о новой парадигме также относится к прикладным задачам теории надежности сооружений.

Литература:

1. Ржаницы.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
2. Усаковский С.Б. С какой точностью вести расчеты прочности сооружений: Монография. – Киев: КНУСА, 2005. – 160 с.
3. Усаковский С.Б. О новой роли теории расчетов сооружений. Строительная механика и расчет сооружений. №4. 2006.
4. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 470 с.
5. Кун Т. Структура научных революций. – М.: Прогресс, 1977. – 300 с.

Анотація.

Розглянуті інженерні задачі, в яких імовірнісні методи теорії надійності (зокрема, показник надійності конструкції) використані як інструмент дослідження.

Annotation.

Probabilistic methods of reliability theory are used as a tool for the study of engineering problems here.