

РАЗДЕЛ III.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.046

УЧЕТ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОСТОЯННЫХ НАГРУЗОК ПРИ РАСЧЕТЕ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Ю.В. Краснощеков
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье приведены результаты исследования факторов, определяющих значения коэффициентов надежности постоянной нагрузки от собственного веса конструкций при расчете зданий и мостов методом предельных состояний.

Материалы и методы. Выявлено, что из-за недостатка опытных данных влияние изменчивости каждого отдельного фактора – плотности материала и конструктивных размеров – на величину коэффициентов надежности постоянной нагрузки до сих пор не определено. Проверочными расчетами установлено, что значения коэффициентов надежности постоянной нагрузки от собственного веса конструкций определяются в основном задаваемой надежностью и допускаемой изменчивостью размеров конструкции.

Результаты. Применение вероятностного подхода к оценке коэффициентов надежности по нагрузке позволяет обоснованно назначать и снижать расчетные значения постоянных нагрузок. При применении вероятностного метода суммирования дисперсий коэффициент надежности по нагрузкам для собственного веса многослойных конструкций мостовых покрытий снижается до 10%.

Обсуждение и заключение. Коэффициент вариации собственного веса многослойных конструкций зависит от контроля при их изготовлении и эксплуатации, при налаженном контроле коэффициент надежности по нагрузкам для собственного веса многослойных конструкций можно значительно снижать. С целью повышения надежности мостов и ввиду большой изменчивости собственного веса элементов дорожного покрытия, особенно асфальтобетонных слоев, их нормативные значения рекомендуется назначать с повышенной обеспеченностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: надежность сооружений, постоянная нагрузка, собственный вес конструкций, изменчивость параметров, коэффициент надежности, многослойная конструкция, вероятностный метод расчета.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Значения коэффициентов надежности постоянной нагрузки от собственного веса конструкций определяются в основном задаваемой надежностью и допускаемой изменчивостью размеров конструкции.

2. Для определения коэффициентов надежности постоянной нагрузки от веса многослойных конструкций эффективен способ суммирования дисперсий.

3. Большая изменчивость размеров элементов покрытия мостов требует установления нормативных значений собственного веса с повышенной обеспеченностью.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность зданий и сооружений зависит от точности прогнозирования на период эксплуатации проектных нагрузок и воздействий. В любых расчетных ситуациях присутствуют постоянные нагрузки, доля которых в общей совокупности может быть весьма значительной, особенно при расчете на аварийные воздействия, когда кратковременные нагрузки не учитываются [1, 2, 3, 4, 5].

К постоянным нагрузкам относят фиксированные (т.е. привязанные к конкретному месту) воздействия от собственного веса конструкций, давления воды и грунта, стаци-

онарного оборудования, дорожного покрытия и некоторые другие воздействия, неизменные или мало изменяющиеся в течение всего срока службы сооружения. Нормы проектирования ориентированы на вероятностную оценку постоянных нагрузок. В частности, результаты измерений свидетельствуют о возможности представления случайной нагрузки от собственного веса конструкций нормальным законом распределения. Такая модель рекомендуется Объединенным комитетом по надежности конструкций (JCSS) для упрощения расчетов и обоснования безопасности зданий и сооружений [6].

Изменчивость (вариативность) нагрузки от собственного веса конструкций обусловлена изменчивостью плотности (удельного веса) строительных материалов и отклонением геометрических размеров конструктивных элементов от номинальных значений [7, 8, 9, 10]. Коэффициент вариации нагрузки от собственного веса несущих конструкций составляет 0,05 – 0,1 [9].

Для конструкций заводского изготовления нормативное значение собственного веса определяется на основании стандартов, рабочих чертежей или паспортных данных, а для других конструкций и материалов (в том числе грунтов) – по проектным (номинальным) размерам и характеристикам плотности с учётом состояния (например, влажности) в условиях возведения и эксплуатации сооружения. Следует учитывать также, что проектные допуски часто не выдерживаются и собственный вес конструкций может превышать проектный на 20 – 30% [11].

Отклонения расчётных значений постоянной нагрузки от нормативных значений учитываются коэффициентами надёжности по нагрузке γ_f . Значения коэффициентов перегрузки для зданий, установленные российскими нормами (СНиП «Нагрузки и воздействия») к каждому виду постоянной нагрузки, находятся в пределах $\gamma_f = 1,05 – 1,3$. В нормах проектирования мостов и труб (СНиП «Мосты и трубы») применяют другие значения коэффициентов перегрузки $\gamma_f = 1,1 – 1,5$ (в редакции 1984 г. для покрытий городских мостов даже $\gamma_f = 2,0$), несмотря на то, что для различных сооружений применяются материалы с одинаковым собственным весом. Например, для конструкций зданий из бетона со средней плотностью свыше 1600 кг/м^3 $\gamma_f = 1,1$, а для бетонных элементов пролетных строений мостов $\gamma_f = 1,3$. Проще всего объяснить различие значений коэффициентов надёжности по на-

грузке требованиями повышенной ответственности мостов, однако для этого существуют специальные коэффициенты надёжности по ответственности сооружений. Надёжность несущих конструкций как зданий, так и мостов обеспечивается расчетом по полувероятностному методу предельных состояний согласно ГОСТ 27751, в котором установлены значения таких коэффициентов. Тем более что в нормах проектирования отдельных типов сооружений (мостов, резервуаров и других) допускается устанавливать иные классы соответствующих сооружений и соответствующие значения коэффициентов надёжности.

Цель данного исследования заключается в обосновании численных значений коэффициентов надёжности нагрузки от собственного веса, применяемых при проектировании различных сооружений. Необходимость детального изучения этого вопроса вызвана также тем, что по мере накопления характеристик случайных величин осуществляется постепенный переход к вероятностным методам расчета. Об этом свидетельствуют принципы нормирования воздействий и свойств материалов, принятые в европейских нормах проектирования конструкций различных сооружений (EN 1990). В настоящее время характеристики случайных величин для вероятностных расчетов пытаются получить из анализа коэффициентов надёжности, численные значения которых подтверждены длительной и безопасной эксплуатацией различных сооружений, и допусков на размеры конструкций, указанных действующими нормативными документами. Кстати, еще в 1983 г. проф. Лужин О.В. отмечал, что коэффициенты перегрузки характеризуют стандарты нагрузок, но возражал против термина «определяют стандарты», пока не введены в рассмотрение соответствующие законы распределения нагрузок [12]. В настоящее время существуют рекомендации ГОСТ Р 2394 – 2016 о возможности осторожного применения тех или иных законов распределения, в том числе закона нормального распределения для постоянных нагрузок. Однако, даже допуская применение определенных законов распределения, не всегда удается оценить вероятностные характеристики по нормативным источникам, поэтому исследования надёжности конструкций сооружений и принципов нормирования надёжности всегда актуальны. В значительной степени это относится к конструкциям мостов, при проектировании которых применяются повышенные значения коэффициентов надёжности [13, 14].

К сожалению, международный стандарт ГОСТ Р 2394 – 2016, представляющий собой общую основу для определения правил проектирования, относящихся к строительству и эксплуатации большинства зданий и инженерных сооружений широкого назначения, независимо от применяемых материалов или их сочетаний, не дает конкретного ответа на поставленные вопросы. Мало того, согласно этому стандарту, изменчивость большинства геометрических размеров можно считать малой или незначительной по сравнению с изменчивостью воздействий. Такие геометрические размеры следует принимать как неслучайные (постоянные), что должно быть отражено в проекте. Не означает ли это, что изменчивость геометрических размеров может не учитываться коэффициентами надежности по нагрузке? В то же время в этом документе отмечено, что надежность сооружений рассматривается как всеобъемлющее понятие, включающее в себя взаимно зависимые модели для описания воздействий, правила проектирования, элементы надежности, реакции и сопротивление конструктивных элементов, квалификацию исполнителей, процедуры контроля качества и национальные требования. Изменение даже одного отдельно взятого коэффициента может нарушить общий уровень надежности сооружения, поэтому важно знать влияние каждого фактора, учитываемого в структуре коэффициентов надежности на его величину.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вероятностная модель коэффициента надежности постоянной нагрузки.

Практически любые постоянные нагрузки целесообразно рассматривать в виде случайных величин \tilde{g} , эквивалентных равномерно распределённым нагрузкам. При распределении \tilde{g} по нормальному закону расчетное значение g постоянной нагрузки с обеспеченностью, характеризуемой параметром (индексом надежности) β , можно представить в зависимости от среднего значения \bar{g} и стандартного отклонения s_g или коэффициента вариации v_g

$$g = \bar{g} + \beta s_g = \bar{g}(1 + \beta v_g). \quad (1)$$

В методе предельных состояний расчетные g и нормативные g_n значения, каждое из которых определяется функцией (1) с соответствующими значениями β и β_n , связаны между собой коэффициентом надежности по нагрузке γ_f зависимостью $g = \gamma_f g_n$.

Из отношения g и g_n получено выражение для коэффициента надежности постоянной нагрузки, которое можно рассматривать в качестве модели для вероятностных расчетов

$$\gamma_f = \frac{1 + \beta v_g}{1 + \beta_n v_g}. \quad (2)$$

Таким образом, детерминированные величины коэффициентов γ_f , представленные в нормах проектирования, определяются разными условиями формирования и зависят от изменчивости постоянных нагрузок v_g и параметра вероятностной обеспеченности β . Однако величины v_g и β действующими нормами не регламентируются, а определить их значения, необходимые для расчетов на надежность, только по величине γ_f невозможно.

Известно, что нормативные значения большинства постоянных нагрузок на перекрытия g_n обычно равны математическим ожиданиям \bar{g} , а обеспеченность расчётных значений g считается весьма высокой и соответствует вероятности $P(\tilde{g} < g) = 0,998\ 65$, если принять $\beta = 3$.

В этом случае $\beta_n = 0$ и выражение (2) упрощается

$$\gamma_f = 1 + \beta v_g. \quad (3)$$

Отсюда можно определить коэффициенты вариации v_g , характеризующие изменчивость постоянных нагрузок при разных значениях коэффициентов надежности γ_f . Так, для зданий при $\gamma_f = 1,1$ максимальный коэффициент вариации собственного веса бетонных конструкций $v_g = 0,033$, а для элементов мостов $v_g = 0,1$. По величине коэффициента вариации обычно судят о качестве материалов, получается, что при проектировании и строительстве зданий требования к качеству в 3 раза превышают соответствующие требования к мостам. Это противоречит общепринятым утверждениям о повышенной надежности мостов.

Существуют вероятностные модели плотности и размеров, которые определяют вероятностную модель нагрузки от собственного веса конструкции.

Плотность представляется в виде суммы номинального значения ρ_{nom} и отклонения $\Delta\rho$ от ρ_{nom}

$$\rho = \rho_{nom} + \Delta\rho. \quad (4)$$

Величина $\Delta\rho$ также представляется в виде суммы систематических $\Delta\rho_s$ и случайных $\tilde{\Delta\rho}$ отклонений:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_s + \tilde{\Delta}\rho. \quad (5)$$

Изменчивость плотности зависит от многих факторов, среди которых основными являются структура и физико-технические свойства. Для некоторых материалов имеется статистическое соответствие между математическими ожиданиями плотности и прочности. В таблице 1 приведены данные изменчивости плотности некоторых материалов [6].

Таблица 1
СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ
ВАРИАЦИИ ПЛОТНОСТИ НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ
Table 1
AVERAGE VALUES AND DENSITY VARIATION
COEFFICIENTS OF SOME MATERIALS

Материал	Среднее значение, кг/м ³	Коэффициент вариации
Сталь	7700	< 0,01
Тяжелый бетон	2400	0,01 – 0,04
Высокопрочный бетон	2400 – 2600	0,03
Легкий бетон		0,04 – 0,08
Ячеистый бетон		0,05 – 0,1
Кирпичная кладка		0,05
Древесина	440 – 680	0,1

В России показатели статистической изменчивости плотности материалов не нормируются. Однако по нормам проектирования бетонных и железобетонных конструкций средняя плотность тяжелого бетона варьируется от 2 200 кг/м³ до 2 500 кг/м³ при рекомендуемом значении 2 400 кг/м³. Согласно ГОСТ 26 633 диапазон допускаемых значений средней плотности тяжелого и мелкозернистого бетона от 2 000 кг/м³ до 2 500 кг/м³ соответствует коэффициенту вариации 0,04 при $\beta = 3$, а значение 2 400 кг/м³ обеспечено на 95%.

По аналогии с плотностью размеры (линейные, поверхностные или объёмные) конструктивных элементов также представляются в виде суммы

$$a = a_{\text{ном}} \pm \Delta a, \quad (6)$$

где $a_{\text{ном}}$ – номинальный размер согласно чертежам.

При назначении Δa учитывается возможность неблагоприятных отклонений от нормативных или номинальных значений, а также эффект одновременной реализации нескольких геометрических отклонений. Параметр a может описывать геометрические дефекты (при этом $a_{\text{ном}} = 0$) [15].

В большинстве случаев номинальные значения соответствуют средним размерам. Различают два типа отклонений от среднего значения геометрических размеров: начальные (не зависящие от времени) отклонения в результате изготовления и монтажа, а также отклонения, зависящие от времени в результате нагружения или действия других факторов. Начальные отклонения могут быть описаны случайной переменной, а зависящие от времени отклонения считаются систематическими.

Отклонения от средних размеров в общем случае представляют в виде

$$\Delta\hat{a} = \overline{\Delta\hat{a}} + \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 + \tilde{a}_3, \quad (7)$$

где $\overline{\Delta\hat{a}}$ – математическое ожидание по генеральной совокупности (по всем партиям) элементов; \tilde{a}_1, \tilde{a}_2 и \tilde{a}_3 – случайные величины (функции), характеризующие соответственно межпартионную, внутрипартионную и внутриэлементную изменчивость (при математических ожиданиях $\tilde{a}_1 = \tilde{a}_2 = \tilde{a}_3 = 0$).

Значения отклонений размеров зависят от принятой системы допусков. На рисунке 1 представлена функция распределения вероятности размера a при ширине допуска $2\Delta a$ при предельном отклонении $\Delta a = 1,645s_a$, соответствующим вероятности 0,05. Вместо коэффициента 1,645 могут быть выбраны иные значения. По правилу «трех сигм» принимается коэффициент, равный 3.

Для оценки веса конструкций необходимо знать характеристики изменчивости толщины (высоты поперечного сечения) конструктивных элементов. Например, нормами проектирования и строительства зданий и сооружений СП 70.1330 (кроме мостов и некоторых других) установлен допуск на размер поперечного сечения + 6 мм (при толщине до 200 мм), который контролируется при приеме в эксплуатацию монолитных бетонных и железобетонных конструкций. Нормами проектирования дорог СП 78.13330 установлены допускаемые отклонения от проекта толщины бетонных слоев дорожных одежд $\pm 5 - 10\%$ (в зависимости от уровня контроля) без привязки к номинальной толщине слоя. Заметим, что нормируются не стандартные отклонения или коэффициенты вариации, которые необходимы для вероятностных расчетов, а максимальные отклонения от проектных значений.

Пренебрегая изменчивостью плотности бетона, используем для анализа влияния случайной изменчивости размеров на изменчивость нагрузки от собственного веса формулу (3) при номинальной толщине конструкции

РАЗДЕЛ III. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

$a = 3$ см, соответствующей размеру выравнивающего слоя дорожной одежды. В конструкциях зданий допустимое увеличение толщины на $\Delta a = \beta s_a = 6$ мм соответствует произведению $\beta v_a = 0,2$ и коэффициенту перегрузки $\gamma_f = 1,2 < 1,3$. На мостах при увеличении толщины на $\beta s_a = 3$ мм произведение $\beta v_a = 0,1$ и коэффициент перегрузки $\gamma_f = 1,1 < 1,3$. При по-вышенном контроле коэффициент перегрузки $\gamma_f = 1,05$. Численным значениям произведений βv_a соответствуют разные комбинации параметров β и v_a , но как в том, так и в другом случае при реальных допусках размеров очевидны несоответствия полученных результатов и нормативных значений коэффициентов перегрузки.

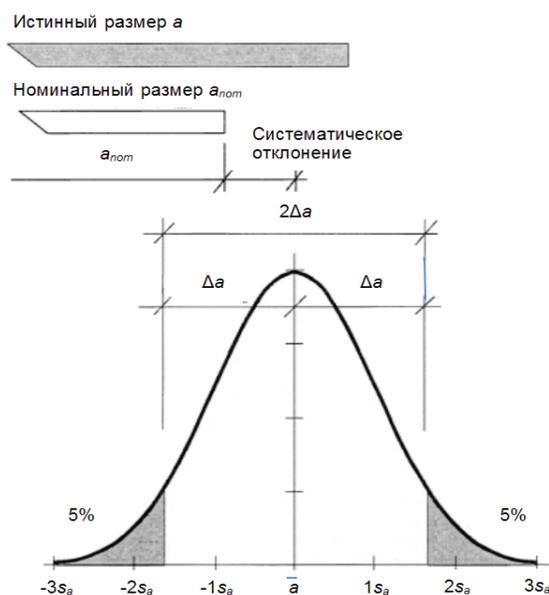


Рисунок 1 – Характеристики размера a
Figure 1 – A size characteristics

Считается, что так как случайные величины плотности и размеров распределяются по закону, близкому к нормальному, то при их независимости дисперсия нагрузки от собственного веса определяется по формуле

$$s_g^2 = s_p^2 + s_a^2. \quad (8)$$

или в коэффициентах вариации

$$v_g^2 = v_p^2 + v_a^2. \quad (9)$$

Предположим, что в рассмотренном выше примере учтено влияние изменчивости плотности бетона. По формулам (3) и (9) можно

определить допустимое значение изменчивости плотности $v_p = [(v_g - 1)^2 - \beta^2 v_a^2]^{1/2} / \beta$. При $v_f = 1,3$, $\beta = 3$ и значениях βv_a , полученных выше, допустимые значения коэффициентов вариации плотности бетона для зданий $v_p = 0,07$, а для мостов $v_p = 0,09$ значительно пре-вышают значения, указанные в таблице 1.

Таким образом, коэффициенты надежности собственного веса бетонных конструкций в нормах проектирования зданий и мостов практически не зависят от изменчивости плотности материала и проектных допусков на размеры, а характеризуются в основном параметрами β и v_a .

Установлено, что изменчивость собственного веса конструкций незначительна, а коэффициент вариации v_g мал, поэтому нормативное (характеристическое) значение веса конструкций обычно рассматривается как среднее значение статистического распределения, которое можно считать нормальным. Но при $V_g \geq 0,1$ согласно европейским нормам изменчивость считается существенной [16].

По европейским нормам, если собственный вес может изменяться со временем, следует учитывать его большее (верхнее) $g_{sup} = \bar{g} (1 + 1,64v_g)$ и меньшее (нижнее) $g_{inf} = \bar{g} (1 - 1,64v_g)$ характеристическое значение, соответствующее 95%-ной и 5%-ной квантилям нормального распределения (см. рисунок 2). Эта особенность относится к собственному весу элементов с относительно большой изменчивостью (гидроизоляция, штукатурка и т.п.) при коэффициенте вариации в течение расчетного срока эксплуатации более 0,05 – 0,1 [16, 17]. Сюда можно отнести и слои дорожных одежд.

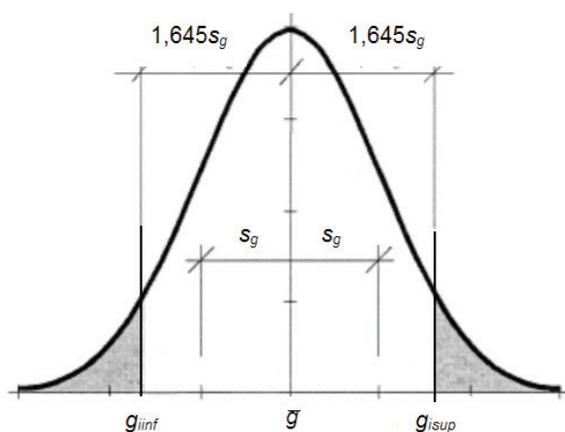


Рисунок 2 – Границы характеристических величин на основе нормального распределения
Figure 2 – Characteristic limits on the basis of normal distribution

В связи с этим учитывается различие между благоприятными и неблагоприятными постоянными воздействиями в отношении рассматриваемого эффекта. Верхнее характеристическое значение обычно соответствует неблагоприятному воздействию, а нижнее – благоприятному воздействию. При определении усилий в статически неопределенных конструктивных системах учет разных характеристических значений постоянных нагрузок зависит от положения временной нагрузки.

Если к собственному весу бетонных элементов мостов применить отмеченную особенность, то по формуле (2) можно уточнить максимальное значение коэффициента вариации для элементов покрытия мостов $v_g = (1,3 - 1)/(3 - 1,3 \cdot 1,645) = 0,348$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменчивость систем постоянной нагрузки.

При сборе постоянных нагрузок приходится суммировать иногда до десятка отдельных нагрузок, каждая из которых имеет свой статистический разброс [7, 10]. Основной нагрузкой, действующей, например, на перекрытия гражданских зданий, является группа постоянных во времени нагрузок от собственного веса конструкций, веса стационарных перегородок и оборудования. Подобная комбинация нагрузок от собственного веса многослойной конструкции дорожных одежд применяется при проектировании пролетных строений мостов. Суммарная нагрузка включает, как правило, несколько практически независимых составляющих \bar{g}_i . Известно, что сумма независимых случайных величин \bar{g}_i стремится к нормальному закону распределения [18].

Так как изменчивость постоянных нагрузок относительно невелика, то точность применения закона нормального распределения к таким нагрузкам возрастает.

Покажем, что при вероятностном расчёте изменчивость суммарной нагрузки по сравнению с поэлементным расчётом уменьшается по мере увеличения числа нагрузок. В действующих нормах это обстоятельство не учитывается, и постоянные нагрузки суммируются без учёта коэффициентов сочетания.

Обобщённый коэффициент перегрузки при традиционном расчёте

$$\tilde{a}_{f0} = \frac{\sum_{i=1}^I \tilde{a}_f g_{fi}}{\sum_{i=1}^I g_{fi}} \quad (10)$$

Для вероятностного расчёта используем основные свойства суммы случайных, корреляционно не связанных величин в виде $\bar{g} = \bar{g}_1 + \bar{g}_2 + \dots + \bar{g}_l$ и $s_g^2 = s_{g1}^2 + s_{g2}^2 + \dots + s_{gl}^2$. Изменчивость (коэффициент вариации) суммарной нагрузки $v_g = \sqrt{s_{g1}^2 + s_{g2}^2 + \dots + s_{gl}^2} / (\bar{g}_1 + \bar{g}_2 + \dots + \bar{g}_l)$.

Уточняя долю каждой нагрузки на перекрытии весовыми коэффициентами $\alpha_i = \bar{g}_i / (\bar{g}_1 + \bar{g}_2 + \dots + \bar{g}_l)$ при $i = 1, 2, \dots, l$, получим выражение для коэффициента вариации суммарной нагрузки в виде

$$v_g = \sqrt{\alpha_1^2 v_{g1}^2 + \alpha_2^2 v_{g2}^2 + \dots + \alpha_l^2 v_{gl}^2}, \quad (11)$$

где α_i – весовые коэффициенты l -х нагрузок.

Выражение для обобщённого коэффициента получаем из формулы (3):

$$\gamma_{f0} = 1 + \beta v_g. \quad (12)$$

При одинаковой обеспеченности β значений всех составляющих и обобщённой нагрузки формулу (12) можно представить в виде

$$\gamma_{f0} = 1 + \sqrt{\alpha_1^2 (\gamma_{f1} - 1)^2 + \alpha_2^2 (\gamma_{f2} - 1)^2 + \dots + \alpha_l^2 (\gamma_{fl} - 1)^2}. \quad (13)$$

Для иллюстрации рассмотрим численный пример. В таблице 2 приведены результаты расчёта постоянных нагрузок, эквивалентных равномерно распределённым нагрузкам на перекрытиях гражданского здания.

Таблица 2
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ НАГРУЗОК НА ПЕРЕКРЫТИЯ
Table 2
DETERMINATION OF OVERLAP CALCULATED LOADS

Вид нагрузки	g_{ni} , кПа	γ_{fi}	g_i , кПа
1. Вес плит перекрытия	3	1,1	3,3
2. Вес подготовки под полы из лёгкого бетона	1,5	1,3	1,95
3. Вес пола	1	1,3	1,3
4. Вес перегородок	2	1,2	2,4
Итого	7,5		8,95

Пример 1. Обобщённый коэффициент перегрузки по формуле (10) $\gamma_{f0} = 8,95/7,5 = 1,193$. При $\alpha_1 = 3/7,5 = 0,4$; $\alpha_2 = 1,5/7,5 = 0,2$; $\alpha_3 = 1/7,5 = 0,133$; $\alpha_4 = 2/7,5 = 0,267$ и значениях $v_{gi} = \gamma_{fi}/3$, принятых по формуле (3) при $\beta = 3$, по формуле (11) определяем $v_g = 0,038$. Обобщённый коэффициент перегрузки, вычисленный по формулам (12) или (13), $\gamma_{f0} = 1 + 3 \cdot 0,038 = 1,115$ соответствует расчётной нагрузке $g = 7,5 \cdot 1,115 = 8,36$ кПа, которая на 7% меньше, чем вычисленная традиционным методом $g = 8,95$ кПа.

В таблице 3 приведены результаты расчёта постоянных нагрузок от веса дорожной одежды на пролетном строении автодорожного моста, заимствованные из работы [19], с коэффициентами перегрузки по действующим нормам проектирования.

Пример 2. Обобщённый коэффициент перегрузки по формуле (10) $\gamma_{f0} = 54,4/38,99 = 1,4$. При $\alpha_1 = 7,25/38,99 = 0,186$; $\alpha_2 = 1,73/38,99 = 0,044$; $\alpha_3 = 11,5/38,99 = 0,295$; $\alpha_4 = 18,51/38,99 = 0,475$ и значениях $v_{gi} = \gamma_{fi}/3$, принятых по формуле (3) при $\beta = 3$, по формуле (11) определяем $v_g = 0,087$. Обобщённый коэффициент перегрузки, вычисленный по формулам (12) или (13), $\gamma_{f0} = 1 + 3 \cdot 0,087 = 1,26$ соответствует расчётной нагрузке $g = 38,99 \cdot 1,26 = 49,13$ кПа, которая на 10% меньше, чем вычисленная традиционным методом $g = 54,4$ кПа.

Следует отметить, что статистическая независимость веса частей многослойной кон-

струкции принимается при отсутствии системного контроля толщины дорожной одежды, когда контролируется толщина отдельных слоев и допускается накопление приращений по толщине одежды в целом. При системном контроле накопление приращений ограничивается, поэтому при расчете постоянной нагрузки следует учитывать корреляционную зависимость размеров и веса слоев. Причем данная зависимость имеет отрицательный характер, когда случайному увеличению толщины одного слоя соответствует уменьшение толщины смежного слоя. Такая зависимость возможна, например, при устройстве двухслойного или многослойного покрытия из асфальтобетона. Стандартное отклонение толщины двухслойного покрытия при отрицательном значении коэффициента корреляции k определяется по формуле

$$s_{12} = \sqrt{s_1^2 - 2ks_1s_2 + s_2^2} \quad (14)$$

Например, толщину двухслойного покрытия из асфальтобетона можно рассматривать как сумму двух случайных величин δ_1 и δ_2 . Согласно теории вероятностей дисперсия суммы двух случайных величин равна сумме их дисперсий плюс удвоенный корреляционный момент [17]

$$s_{12}^2 = s_1^2 + s_2^2 + 2K_{12} \cdot \quad (15)$$

Таблица 3
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ НАГРУЗОК НА ПРОЛЕТНОЕ СТРОЕНИЕ
Table 3
DETERMINATION OF FLIGHT STRUCTURE CALCULATED LOADS

Вид нагрузки	g_{ni} , кПа	γ_{fi}	g_i , кПа
1. Вес выравнивающего слоя из мелкозернистого бетона $\delta = 3$ см	7,25	1,3	9,43
2. Вес гидроизоляции $\delta = 1$ см	1,73	1,3	2,25
3. Вес защитного слоя из армированного бетона $\delta = 4$ см	11,5	1,3	14,95
4. Вес асфальтобетона $\delta = 7$ см	18,51	1,5	27,77
Итого	38,99		54,4

При равных толщинах слоев $\delta_1 = \delta_2 = 4$ см и 10%-х отклонениях от номинальных значений толщины дисперсии

$s_1^2 = s_2^2 = (0,1 \cdot 4/3)^2 = 0,0178$ см² и $s_{12}^2 = (0,1 \cdot 8/3)^2 = 0,0711$ см². Из формулы (15) определяем корреляционный момент $K_{12} = (0,0711 - 2 \cdot 0,0178)/2 = 0,0178$ см². Отсюда коэффициент корреляции $k = K_{12}/s_1s_2 = 0,0178/0,1332 = 1$. По формуле (14) $s_{12} = 0$, что означает возможность снижения коэффициента надежности по нагрузке до 1 при качественном контроле при изготовлении и эксплуатации дорожных одежд. При отсутствии корреляционной зависимости $K_{12} = 0$ и $s_{12} = 0,189$ и. Если учитываются 5%-е отклонения номинальных значений, то дисперсии $s_1^2 = s_2^2 = (0,05 \cdot 4/3)^2 = 0,0044$ см², $s_{12} = 0,094$ и $Y_f = 1 + 3 \cdot 0,094 = 1,28$ (в нормах проектирования принято близко к среднему значению $Y_f = 1,5$).

При обследовании существующих конструкций имеется принципиальная возможность уточнить фактические размеры и плотность материала, а не использовать номинальные значения и справочные сведения [20]. Например, согласно нормам на обследование конструкций, постоянные нагрузки на покрытиях и перекрытиях определяют по результатам вскрытий с определением плотности и толщины слоёв или по результатам взвешиваний материалов на вырезанных участках площадью от 0,04 до 0,25 м²; при этом число вскрытий должно быть не менее трёх на этаж и не менее шести на 500 м² площади.

В зависимости от числа n вскрытий нормативная нагрузка вычисляется по формуле

$$g_n = \bar{g} + t_\alpha s_g / \sqrt{n}, \quad (16)$$

где t_α – коэффициент Стьюдента, учитывающий объём измерений [18].

В работе [6] рекомендуется учитывать корреляцию плотности материалов между точками зондирования. Допускается принимать в пределах одного элемента коэффициент корреляции от 0,7 до 0,85.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значения коэффициентов надежности γ_f постоянной нагрузки g от собственного веса конструкций определяются в основном обеспеченностью в виде коэффициента β , равного числу стандартов в отклонении от средних значений, и допускаемой изменчивостью в виде коэффициента вариации v_g , который

зависит от уровня контроля при изготовлении и эксплуатации конструкций. Применение вероятностного подхода позволяет обоснованно назначать и снижать расчетные значения коэффициентов надежности по нагрузкам.

Изменчивость собственного веса конструкций v_g зависит от изменчивостей плотности материала v_p и конструктивных размеров v_a , однако в установленных нормами проектирования коэффициентах надежности постоянной нагрузки доля каждого из этих факторов не установлена. Применительно к конструкциям из бетона рекомендуется принимать $v_p = 0,04$, а обеспеченность нормативных значений плотности $\beta_n = 1,645$ и размеров $\beta_n = 0$. При этом из совместного решения уравнений (2) и (9) можно определить допускаемое значение v_a по заданной обеспеченности расчетного значения β (например, при $\gamma_f = 1,3$ и $\beta = 3$ имеем $v_a = 0,122$); показатель надежности β при контролируемом значении v_a (например, при $\gamma_f = 1,3$ и $v_a = 0,05$ имеем $\beta = 6$, а при $v_a = 0,2$ $\beta \approx 2$) либо уточнить значение коэффициента надежности по нагрузке при известных значениях β и v_a (например, при $\beta = 3$ и $v_a = 0,2$ следует принять $\gamma_f = 1,6$). Следует отметить, что допускаемые значения параметров βv_a в приведенных примерах значительно превышают соответствующие нормативные допуски на размеры.

При применении метода суммирования дисперсий расчетную нагрузку от собственного веса многослойных конструкций можно снижать до 10%. Коэффициент вариации собственного веса многослойных конструкций зависит от контроля размеров при изготовлении и эксплуатации сооружений. При налаженном контроле коэффициент надежности по нагрузкам для собственного веса многослойных конструкций можно снижать.

С целью повышения надежности мостов и ввиду большой изменчивости собственного веса элементов покрытия нормативные значения собственного веса рекомендуется назначать с повышенной обеспеченностью [21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. М.: Изд-во АСВ, 2007. 256 с.
2. Райзер В.Д. К проблеме живучести зданий и сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77 – 78.
3. Starossek U., Haberland M. Robustness of structures [Надежность конструкций]. International Journal of Lifecycle Performance Engineering. 2012. no. 1. pp. 3 – 21.
4. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструк-

ций при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 4. С. 5 – 9.

5. Краснощеков Ю.В. Расчет каркасного здания на прогрессирующее обрушение при аварийном отказе колонны // Строительная механика и расчет сооружений. 2017. № 1. С. 54 – 58.

6. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. [www.jcss.byg.dtu.dk].

7. Ржаницын А.Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.

8. Райзер В.Д. Теория надёжности сооружений. М. : Изд-во АСВ, 2010. 384 с.

9. Шпете Г. Надёжность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.

10. Краснощеков Ю.В., Заполева М.Ю. Основы проектирования конструкций зданий и сооружений. М. : Инфра-Инженерия, 2018. 296 с.

11. Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. М. : Стройиздат, 1987. 219 с.

12. Лужин О.В. Вероятностные методы расчета сооружений. М. : МИСИ, 1983. 124 с.

13. Кожушко В.П. Оценка несущей способности пролетных строений эксплуатируемых автодорожных мостов // Вестник ХНАДУ. 2006, № 34 – 35. С. 76 – 79.

14. Ельцова В.Ю. Значение технических регламентов при обеспечении надежности мостов // Вектор науки ТГУ. 2013. № 3, С. 164 – 166.

15. Designers' Guide to Eurocode 1: Actions on buildings. EN 1991-1-1 and -1-3 to -1-7. H. Gulvanessian, P. Formichi and J.-A. Calgaro. 978 0 7277 3156 2. Published 2009.

16. Designers' Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of structural design. H. Gulvanessian, J.-A. Calgaro and M. Holický. 978 0 7277 3011 4. Published 2002.

17. MacGregor, J.G., Mirza S.A., Ellingwood B. Statistical analysis of resistance of reinforced and prestressed concrete members. – Journal of the American Prestressed Concrete Institute. – 1983. – vol. 80. – № 3. – p. 167 – 176.

18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М. : Высшая школа, 1999. 576 с.

19. Лившиц Я.Д., Онищенко М.М., Шкуратовский А.А. Примеры расчета железобетонных мостов. К. : Вища школа, 1986. 263 с.

20. Краснощеков Ю.В. Научные основы исследований взаимодействия элементов железобетонных конструкций. Омск : СибАДИ, 1997. 276 с.

21. Calgaro J.-A., Tschumi M. and Gulvanessian H. Designers' Guide to EN 1991 for Bridges. Thomas Telford, London, 2009.

ACCOUNTING OF CONSTANT LOADS' VARIABILITY IN CALCULATION OF BUILDINGS' AND STRUCTURES' CONSTRUCTIONS

Y.V. Krasnoshchekov

ABSTRACT

Introduction. The article presents the investigation results of the factors determining the reliability coefficients' values of the constant load from the weight of the structures in the buildings' and bridges' calculation by the method of limiting states.

Materials and methods. However, the constant load has not yet been determined due to the lack of the experimental data, the variability influence of each individual factor: the density of the material and structural dimensions on the reliability coefficients' value. The reliability coefficients' values of the constant load from the weight of the structures are also determined mainly by the specified reliability and the allowed variability in the structure dimensions.

Results. The probabilistic approach's application to the reliability coefficients' estimation on the load allows reasonably assign and reduce the calculated values of the constant loads. The application of the probabilistic method of the dispersions' summation therefore leads to the reduction of the reliability factor for the loads of the self-weight and multi-layer bridge structures to 10%.

Discussion and conclusion. The self weight's variation coefficient of the multilayer structures depends on the control during their manufacture and operation, so the reliability factor for the self weight loads of the multilayer structures could be significantly reduced by the established control. In order to improve the bridges' reliability and because of the large variability in the pavement elements' weight, especially in the asphalt-concrete layers' weight, their normative values should be assigned with the increased security.

KEYWORDS: structures' reliability, constant load, structures' weight, variability of parameters, reliability factor, multilayer construction, probabilistic calculation method.

REFERENCES

1. Perelmuter A.V. Izbrannyye problem nadegnosti i bezopasnosti stroitelnykh konstrukzij [Selected problems of reliability and safety of building structures]. Moscow. Izdatelstvo ASV, 2007. 256 p.

2. Raiser V.D. K problem givuchesti zdaniy I [To the problem of survivability of buildings and structures]. Stroitel'naja mekhanika i raschet sooruzhenij. 2012, no 5, pp. 77 – 78.

3. Starossek U., Haberland M. Robustness of structures. International Journal of Lifecycle Performance Engineering. 2012, no. 1, pp. 3 – 21.

4. Nazarov Yu.P., Gorodetsky A.S., Simbirkin V.N. K problem obespechenija g[vuchesti stroitelnykh konstrukzij pri avarijnykh vozdejstvijakh [To the problem of ensuring the survivability of building structures during emergency]. Stroitel'naja mekhanika i raschet soorugenij. 2009, no 4, pp. 5 – 9.

5. Krasnoshchekov Yu.V. Raschet karkasnogo zdaniya na progressirujushchee obrushenie pri avarijnom otkaze kolonny [Calculation of a frame building for a progressive collapse in case of emergency failure of a column]. Stroitel'naja mekhanika i raschet soorugenij. 2017, no 1, pp. 54 – 58.

6. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safeti, 2001. [www.jcss.byg.dtn.dk].

7. Rganizin A.R. Teoriya rascheta stroitelnykh konstrukzij na nadegnost [The theory of calculating building structures for reliability]. Moscow. Strojizdat, 1978. 239 p.

8. Raiser V.D. Teoriya nadegnosti soorugenij [Theory of the reliability of structures]. Moscow. Izdatelstvo ASV, 2010. 384 p.

9. Spaethe G. Nadegnost nesushchikh konstrukzij [Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen]. Moscow. Strojizdat, 1994. 288 p.

10. Krasnoshchekov Yu.V., Zapolewa M.Yu. Osnovy proektirovaniya konstrukzij zdaniy i soorugenij [Basics of designing structures of buildings and structures]. Moscow. Infra-Ingenierija, 2018. 296 p.

11. Vall V.N., Gorokhov E.V., Uvarov B.Yu. Usilenie stalnykh karkasov odnoetagnikh proizvodstvennykh zdaniy pri ikh rekonstrukcii [Strengthening the steel frameworks of single-storey industrial buildings during their reconstruction]. Moscow. Strojizdat, 1987. 219 p.

12. Lugin O.V. Veroyatnostnye metody rascheta soorugenij [Probabilistic methods for calculating structures]. Moscow. MISI, 1983. 124 p.

13. Kogushko B.P. Otsenka nesushchej sposobnosti proletrykh stroenij expluatiруemykh avtodorognykh mostov [Estimation of bearing capacity of span structures of operated road bridges]. Vestnik KHNADU, 2006, no. 34-35). pp. 76 – 79.

14. Eltsowa V.Yu. Znachenie tekhnicheskikh reglamentov pri obespechenii nadegnosti mostov [The importance of technical regulations while ensuring the reliability of bridges]. Vektor nauki TGI, 2013, no. 3. pp. 164 – 166.

15. Designers' Guide to Eurocode 1: Actions on buildings. EN 1991-1-1 and -1-3 to -1-7. H. Gulvanessian, P. Formichi and J.-A. Calgaro. 978 0 7277 3156 2. Published 2009.

16. Designers' Guide to EN 1990 Eurocode: Basis of structural design. H. Gulvanessian, J.-A. Calgaro and M. Holicky. 978 0 7277 3011 4. Published 2002.

17. MacGregor J.G., Mirza S.A., Ellingwood B. Statistical analysis of resistance of reinforced and prestressed concrete members. Journal of the American Prestressed Concrete Institute. 1983. vol. 80. no. 3. pp. 167 – 176.

18. Venttsel E.S. Teoriya verojatnostej [Probability Theory]. Moscow. Vysshaja shkola, 1999. 576 p.

19. Livshits Ya.D. Primery rascheta gelesobetonnykh mostov [Examples of calculation of reinforced concrete bridges]. Kiev. Vishcha shkola, 1986. 263 p.

20. Krasnoshchekov Yu.V. Nauchnye osnovy issledovanij vzaimodejstviya elementov gelezobetonnykh konstrukzij [Scientific foundations of research on the interaction of elements of reinforced concrete structures]. Omsk. SibADI, 1997. 276 p.

21. Calgaro, J.-A., Tschumi, M. and Gulvanessian, H. Designers' Guide to EN 1991 for Bridges. Thomas Telford, London. 2009.

Поступила 16.01.2018, принята к публикации 15.02.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Краснощеков Юрий Васильевич (г. Омск, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции», ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: uv1942@mail.ru). Основное направление научной деятельности – взаимодействие элементов конструктивных систем, надежность зданий и сооружений; 160 опубликованных работ.

Krasnoshchekov Y.V. (Russia, Omsk) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Building Construction", Siberian State Automobile and Highway University – SibADI (644080, Mira, Ave., 5, Omsk, Russia, e-mail: uv1942@mail.ru). The main sphere of scientific research is the collaboration of constructive elements, technical reliability of buildings and constructions. The published researches' number is 160.

УДК 675.72: 528.48: 658.562

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Ю.В. Столбов¹, С.Ю. Столбова², Л.А. Пронина³, А.И. Уваров³

¹ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия;

²ФГБОУ ВО «ОмГТУ», г. Омск, Россия;

³ФГБОУ ВО Омский ГАУ, г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечено, что в последнее время вместо СНиП при строительстве дорог применяются их актуализированные редакции – своды правил СП, в которых требования к точности устройства оснований и покрытий значительно повышены. Для обеспечения повышенных требований к точности высотного положения конструктивных слоев оснований и покрытий автомобильных дорог возникает необходимость применения современных геодезических при-