

УДК 624.014

**М.С. СТІЛЕЦЬКИЙ ПРО МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ І СПОРУД
ВІДПОВІДНО ДО ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ТА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЙОГО РОЗВИТКУ****Оксана Підкошаная**

Державний економіко-технологічний університет транспорту
Україна, 03049, м. Київ, вул. М. Лукашевича, 19
e-mail: pplt79@ukr.net

Важливе місце у галузі будівельних конструкцій і мостобудівництва займає відомий учений-механік, член-кореспондент АН СРСР Микола Станіславович Стрілецький (1885-1967). Особливого значення мають його розробки методів розрахунку конструкцій і споруд на підставі граничних станів, які у колишньому СРСР, як зазначав сам вчений, було застосовано в якості керівного принципу лише з 1 січня 1956 р. [1]. Його було включено на затвердження основного будівельного кодексу СРСР – «Будівельних норм і правил». Важливо зазначити, що цим методом досі розраховуються усі конструкції промислових і цивільних будівель, а також мостів.

М.С. Стрілецький надавав цьому методу особливого значення. Він стверджував, що причиною переходу до розрахунку згідно граничних станів було цілковите неудоконалення попереднього методу розрахунку згідно допустимих напружень, який не відповідав фактичній роботі конструкції й, у першу чергу, конструкцій, які були побудовані із залізобетону та кам'яної кладки, адже компоненти цих споруд мають різні механічні характеристики. А це означає, що на момент вичерпання своєї несучої здатності отримують інші співвідношення напружень, ніж під час роботи у напруженій стадії. Останні суперечили методу розрахунку за допустимими напруженнями.

Вперше у СРСР це протиріччя було помічене проф. О.Ф. Лолейтом у кінці 20-30-х років ХХ ст. [2-4]. У 1938 р. воно отримало відображення у нових «нормах і технічних умовах проектування залізобетонних конструкцій», у так званому методі розрахунку згідно руйнуючих навантажень, в якому на основі досліджень професора О.О. Гвоздева враховувався багатий досвід роботи залізобетону у пружній пластичній стадії [5-6].

Основи методу розрахунку згідно руйнуючих навантажень увійшли до методу розрахунку за граничними станами, який базується на обліку пластичних деформацій – він є першим основним принципом розрахунку конструкцій

за граничними станами. Недоліком методу розрахунків за допустимими напруженнями, загальними для конструкцій, які виконуються з будь-яких матеріалів, є також:

1) принципова рівнозначність коефіцієнта запасу для усіх конструкцій з даного матеріалу та пов'язана з цим можливість обліку специфіки роботи різних конструкцій;

2) неможливість обліку фактичної мінливості навантажень і механічних властивостей будівельних матеріалів;

3) недостатній облік пластичної фази роботи матеріалу;

4) внаслідок перелічених обставин – умовність коефіцієнта запасу згідно методу розрахунку за допустимими навантаженнями і тому фактична міцність різних споруд та їх елементів, а виходить, і недостатній економічний ефект, досягається таким чином.

Ці недоліки утрудняють застосування розрахунку згідно допустимим навантаженням. Вихід було знайдено професором Качінчі (1911 р.) з Будапешта, який запропонував здійснювати статистичне вивчення численних навантажень і механічних властивостей матеріалів. У колишньому СРСР дану думку підтвердив у 1928 р. інженер М.О. Хоціалов [7]. Невдовзі, у 1935 р., він оформив дане питання як спеціальну проблему.

Статистичний облік умов роботи конструкцій і мінливості цих умов є другим основним принципом розрахунку конструкцій згідно граничних навантажень. Однак метод розрахунку за граничним станом принципів відрізняється від методу розрахунку за руйнівними навантаженнями тим, що він висуває інший критерій (основну характеристику) граничного стану конструкцій [8].

М.С. Стрілецький стверджував, що якщо за розрахунку за руйнівними навантаженнями, так само як і за допустимими напруженнями, основною характеристикою граничного стану є руйнування або втрата несучої здатності, то у методі розрахунку конструкцій згідно граничних станів, прийнятому у СРСР, основною хара-

ктеристикою граничного стану вважається стан припинення експлуатації споруди, втрата її експлуатаційної здатності. Цей критерій значно більш загальний, ніж перший (руйнування або втрата несучої здатності), тому що припинення експлуатації можливе від різноманітних обставин і, в тому числі, включає стан втрати несучої здатності як окремий випадок.

Окрім характеристик міцності та конструктивної форми споруди, які враховуються обставинами втрати несучої здатності, до цього критерію належать і такі характеристики, як призначення та значущість споруди, умови та тривалість її експлуатації, економічність та ін. Ось чому такий критерій може бути дуже гнучким і різнобічним. Припинення експлуатації, зв'язане з необхідністю ремонту або заміни частин конструкції, ще не означає руйнування конструкції, а тільки порушує функціонування споруди або діяльності підприємства. Звідси безпосередньо впливає взаємозв'язок між вимогами експлуатаційної здатності, призначенням і значущістю споруди й економічністю.

Припинення експлуатації – не катастрофа, а тільки попередження аварії. Тому для забезпечення експлуатації не потрібно тих додаткових, надзвичайних заходів, які у вигляді спеціального або загального коефіцієнта запасу на всякий непередбачений випадок з'являються для забезпечення стабільності споруди. Усі елементи коефіцієнта запасу при методі розрахунку за граничним станом набувають чіткого фізичного смислу.

Критерій методу розрахунку за граничним станом може бути названим критерієм придатності споруди. Розрахунок повинен забезпечити придатність споруди для виконання свого призначення. Непридатна споруда не має практичної цінності, хоча може зберігати свою міцність.

М.С. Стрілецький вважав, що придатність – основна вимога, яка пред'являється до споруди, є основним критерієм її граничного стану. Припинення експлуатації споруди можливе згідно дуже багатьох причин, тому споруда може мати декілька граничних станів. Микола Станіславович, характеризуючи норми будівництва конструкцій, розглядав три розрахункових граничних стани.

1. *Перший граничний стан* – припинення експлуатації внаслідок того, що вичерпується несуча здатність споруди або з'являються такі остаточні деформації, які роблять подальшу експлуатацію споруди неможливою. Тут є дві ознаки припинення експлуатації. Перша ознака відноситься до споруд і конструкцій, які володіють великою жорсткістю, для яких зали-

шкові деформації несуттєві або мало можливі згідно умов роботи конструкції. При високій якості виготовлення таких конструкцій експлуатація їх може тривати до вичерпання ними несучої здатності. У деформованих конструкціях вирішальним часто є друга ознака першого граничного стану – надмірні залишкові деформації, які роблять неможливою подальшу експлуатацію і споруда стає непридатною ще до втрати нею несучої здатності.

2. *Другий граничний стан* – припинення нормальної експлуатації конструкції внаслідок надзвичайних надмірних коливань або недостатньої жорсткості, коли споруда, залишаючись міцною, перестає відповідати експлуатаційним вимогам, які від неї вимагаються. М.С. Стрілецький наводить приклад з будівництвом висячих мостів, які через невдалу конструктивну форму під час явища резонансу можуть отримати коливання, які перешкоджають подальшій експлуатації мосту. Колони промислових будівель за недостатньої жорсткості також можуть перешкоджати вільному рухові мостових кранів і затрудняють експлуатацію підприємства. Те ж саме у відповідних випадках може стосуватися балкових та інших систем.

3. *Третій граничний стан* – припинення експлуатації внаслідок утворення тріщин у достатньо міцній і жорсткій конструкції. Утворення тріщин у будівельних матеріалах і конструкціях може бути двох видів:

а) утворення тріщин від технологічних, кліматичних та інших несилових факторів, причиною яких є неякісна конструктивна форма; прикладом можуть служити тріщини у сталевих конструкціях при зварюванні, тріщини у дерев'яних конструкціях та їх елементах під час сушіння; такі тріщини попереджаються конструктивними заходами, а не розрахунковим шляхом;

б) утворення тріщин від силових факторів, наприклад, тріщини у кам'яній кладці при її надзвичайній завантаженості, тріщини у залізобетоні, який працює на розтягнення та згин. Утворення тріщин такого типу може бути попереджене у конструкціях розрахунком за їх третім граничним станом, який тому поширюється тільки на залізобетонні та кам'яні конструкції.

М.С. Стрілецький окремо розглядав тріщини, які утворюються у результаті концентрації напруг у пружно пластичних матеріалах. Хоча ці тріщини і силового походження, однак їх поява пов'язана не тільки з силовими факторами, а у першу чергу з неправильностями конструктивної форми, які призводять до крихкого руйнування. Дрібні пошкодження

прирівнюються до технологічних тріщин та усуваються конструктивними заходами; крупні пошкодження безпосередньо впливають на несучу здатність споруди, і силові фактори, які призводять до утворення тріщин, розраховуються за першим граничним станом.

Облік мінливості обставин роботи споруди або конструкції є особливістю розрахунку згідно граничних станів. Мінливість обставин роботи споруди або конструкції може бути зведена до трьох комплексів: мінливість навантажень, мінливість властивостей матеріалів, мінливість умов роботи споруди, конструкції або їх елементів.

М.С.Стрілецький відзначав, що у нормах проектування будівельних конструкцій мінливість навантажень визначається згідно відношення до нормативних навантажень, які близькі за величиною до найбільших навантажень нормальної експлуатації. Мінливість навантажень характеризується спеціальним коефіцієнтом, найбільш можливе значення якого називається *коефіцієнтом перевантаження*. У розрахунок вводиться максимальна величина навантаження, яка дорівнює помноженню нормативного навантаження на коефіцієнт перевантаження та називається *розрахунковим навантаженням*. Для багатьох навантажень коефіцієнт перевантаження визначається статистичним шляхом. Таким чином, конструкції перевіряються на дію розрахункових навантажень.

При статистичному підході до визначення навантажень за одиницю порівняння більш логічніше було б прийняти середньостатистичне навантаження. Однак за таке була прийнята запозичена із старих норм найбільше експлуатаційне навантаження, як більш звичне. Така заміна при відповідному підбиранні коефіцієнтів перевантаження не відбивається на величині розрахункового навантаження. Однак статистичний підхід можливий тільки для навантажень, які багатократно повторюються, достатньо стаціонарні за часом, які утворюють так звані стійкі ряди та залежать від численних факторів, які не піддаються розрахунку, мінливість яких характеризується закономірними кривими розподілу. Такі навантаження можна назвати статистично випадковими.

Типовими для цієї групи атмосферні навантаження (сніг і вітер). На підставі метеорологічних спостережень для них були побудовані криві розподілу, закладені в основу визначення коефіцієнтів перевантаження.

Кранові навантаження неспеціалізованих кранів також слід розглядати як статистично

випадкові, оскільки вказані крани у процесі роботи багатократно піднімають різноманітні вантажі, порядок яких неможливо встановити апіорі. Робота таких кранів у часі достатньо стаціонарна; для навантаження від них також можуть бути побудовані криві розподілу.

Навантаження спеціалізованих кранів, як правило, чітко фіксовані та не можуть вважатися статистично випадковими, однак для усіх кранів було встановлено єдиний коефіцієнт перевантаження. Статистично випадковий характер має мінливість впливів залізничного навантаження внаслідок неправильного розташування колії на мостах. Ці перевантаження враховуються на кранових коліях нормами проектування конструкцій для промислового будівництва поки спеціально не враховуються та не входять до загального коефіцієнту перевантаження кранового навантаження.

Від коефіцієнта перевантаження необхідно відрізнити коефіцієнт планового зростання навантаження, який характеризує збільшення навантаження з течією часу внаслідок ускладнення експлуатації спорудження. Найбільше значення він має для мостових конструкцій у зв'язку із зростанням вантажопідйомності рухомого складу. Коефіцієнт планового зростання є результатом планового передбачення та не має статистичної природи. Проте часто коефіцієнт перевантаження та коефіцієнт планового зростання навантаження поєднуються в один – *коефіцієнт навантаження* (наприклад, для залізничних мостів).

Навантаження перекриттів багатопверхових будівель мають такий же коефіцієнт. Він складається з двох частин: коефіцієнта планового зростання навантаження, який характеризує зростання навантаження від розвитку та зміни технології виробництва, розміщеного на перекритті, і коефіцієнта перевантаження, який характеризує випадкові зміни навантажень внаслідок того, що у деяких випадках, наприклад, при ремонті, на перекритті можуть з'явитися навантаження випадкові, непередбачені технологією виробництва. Хоча така мінливість випадкова, все ж вона не має статистичної природи, тому що нестационарна у часі, і для змін не можуть бути отримані криві розподілу.

Мінливість постійного навантаження повинна розглядатися як статистично випадкова, оскільки вона залежить від таких численних факторів, як об'ємні ваги матеріалів, помилки у дозуванні і т.д. У відповідності з цим постійне навантаження також має коефіцієнт перевантаження. На відміну від інших коефіцієнтів перевантаження постійного навантаження може

бути як більший, так і менший від одиниці. Останній застосовується у тому випадку, коли постійне навантаження є розвантажувальним.

Розрахункове навантаження (помноження нормативного навантаження на коефіцієнт перевантаження) бачиться як найбільш можливе навантаження за час експлуатації споруд.

Мінливість опору матеріалів у нормах проектування конструкцій враховується у порівнянні з опорами конструкцій (механічними якостями), вказаними у відповідних державних стандартах або технічних умовах на матеріали. Ці опори називаються нормативними. Вони мають різну природу, яка встановлюється у відповідності з діючими державними стандартами або технічними умовами.

М.С. Стрілецький наводить приклади, які свідчать, що для гарячекатаної сталі різних марок нормативним опором є бракований мінімум границі текучості згідно до відповідних державних стандартів. Так, для бетону – міцність на осьове стиснення та стиснення при згині або розтягненні, яка отримується на основі кубкової міцності (марка бетону), а також згідно відповідному державному стандарту; для кам'яної кладки – міцність стовпа кладки нормованих розмірів у залежності від марки каменю (цегли) та розчину; для деревини – межа тривалого опору деревини, яка отримується на основі встановленого державним стандартом тимчасового опору.

Статистична обробка результатів випробувань опору матеріалів дала можливість побудувати для них достатньо обґрунтовані криві розподілу та знайти мінімальне значення опору матеріалів, який приймається на відстані трьох стандартів від центру гаусової кривої, якій добре відповідають криві розподілу опору матеріалів.

Нормативні опори не дорівнюють середньостатистичним значенням опорів (центру кривих розподілу), оскільки було визнано доцільним нормативні опори безпосередньо зв'язати з різноманітними вимогами прийомних випробувань матеріалів.

Нормативні опори для різних впливів (стиснення, розтяг, згин, зріз), а іноді і для споріднених матеріалів (наприклад, різних порід дерева) отримуються з основного нормативного опору, згідно з яким є масові дослідні дані згідно їх випробування (розтяг для сталі, стиснення для бетону та каменю і т.д.), шляхом помноження на перехідні коефіцієнти, обґрунтовані досвідом і теорією.

Відношення мінімального значення опору матеріалу до нормативного називається *ко-*

фіцієнтом однорідності, який може розглядатися як характеристика мінливості властивостей даного матеріалу. коефіцієнти однорідності різних матеріалів непорівнянні між собою, оскільки їх нормативні опори мають різну природу. Зазвичай у коефіцієнт однорідності уводяться й інші обставини роботи матеріалу у конструкції. Так, у коефіцієнт однорідності сталевих конструкцій уводиться вплив мінливості фактичних розмірів перетинів елементів конструкції у відповідності зі встановленими допусками; у коефіцієнт однорідності дерев'яних конструкцій уводиться вплив розмірів конструкції (масштабний фактор), кам'яних – індивідуальність виконання кам'яної кладки, які залежать від навиків і кваліфікації муляра.

У цьому випадку, коли компоненти коефіцієнта однорідності мають статистичну природу, поєднання їх також враховуються статистичним шляхом. Значить коефіцієнт однорідності є складним. Помноження коефіцієнта однорідності на нормативний опір називається *розрахунковим опором*. Останній представляє собою найменш можливий опір матеріалу за час експлуатації споруди. Згідно розрахунковому опору підбираються перетини елементів конструкцій.

Особливості роботи різного роду конструкцій або їх елементів характеризуються третім основаним коефіцієнтом методики розрахунку за граничним станом – *коефіцієнтом умов роботи*. Цей коефіцієнт дуже різноманітний і може бути розбитий на декілька категорій. Перш за все необхідно відзначити коефіцієнт умов роботи матеріалу й елементів конструкцій при врахуванні втомленості, втрати стійкості і т.д.; далі коефіцієнти умов роботи з'єднань, особливо різноманітних у дерев'яних конструкціях, які характеризують роботу різного роду з'єднань у сталевих конструкціях – заклепки, зварювання і т.д.; потім коефіцієнти, які враховують особливі умови проведення робіт, наприклад зимову кладку у кам'яних конструкціях, індустріальне виготовлення елементів збірної залізобетону і т.д.; коефіцієнти, які враховують різну значущість і капітальність споруд, наприклад, у залізничних мостах.

Дуже часто коефіцієнти умов роботи об'єднуються з коефіцієнтом однорідності, що спрощує розрахунок, хоча і збільшує кількість розрахункових опорів. Особливо повинно бути підкреслене значення коефіцієнтів умов роботи, які зв'язують роботу конструкції з умовами експлуатації. Покращення нагляду за спорудженням та експлуатацією може бути реалізоване у розра-

хунку за допомогою цих коефіцієнтів з отриманням відповідного економічного ефекту.

Розробка програми для вивчення ефекту дуже бажана. Особливо доцільне вироблення об'єднаної програми щодо вивчення мінливості факторів роботи конструкцій через принципове значення цих питань для методу у цілому. Дуже важливими є також об'єднані дослідження роботи конструкції та матеріалу у пластичній стадії, а також вивчення процесу втрати несучої здатності. Хоча таких досліджень досить багато, але вони розділені, і деякі, дуже важливі питання, наприклад, розвиток пластичних деформацій при складному завантаженні та напруженому стані і перехід до крихкого стану, теоретично й експериментально вивчені недостатньо. Також вимагають об'єднаного рішення з точки зору рівномірності споруд питання про граничний розвиток пластичних деформацій і деформативних систем і нормуванні остаточних деформацій.

Підкошаная Оксана Професор М.С. Стрелецький про методи розрахунку конструкцій і споруд відповідно до граничних станів та основні напрямки його розвитку

У статті висвітлюється внесок професора М.С. Стрелецького у вирішення проблеми коефіцієнта запасу, беручи до уваги мінливість основних параметрів для пропонованих конструкцій. Професор М.С. Стрелецький у 40-і роки ХХ ст. чітко сформулював ідею про роздільний аналіз мінливості навантажень і міцність матеріалів і про роздільне їх урахування у нормах – ідею, яка була покладена в основу методу розрахунку за граничними станами.

Ключові слова: будівельна механіка, опір матеріалів, граничний стан, коефіцієнти запасу міцності, М.С. Стрелецький

Підкошаная Оксана Професор Н.С. Стрелецький о методах расчета конструкций и сооружений в соответствии с граничными состояниями и основными направлениями его развития

В статье освещается вклад профессора Н.С. Стрелецкого в решение проблемы коэффициента запаса, учитывая изменчивость основных параметров для предлагаемых конструкций. Профессор Н.С. Стрелецкий в сороковые годы ХХ в. четко сформулировал идею об отдельном анализе изменчивости нагрузок и прочность материалов и о раздельном их учете в нормах – идею, которая была положена в основу метода расчета по предельным состояниям.

Ключевые слова: строительная механика, сопротивление материалов, предельное состояние, коэффициенты запаса прочности, Н.С. Стрелецкий

Pidkoshanaya Oksana Professor M. Streletsky about methods of calculating structures and buildings in accordance with the boundary states and the main directions of its development

The article highlights the contribution of Professor M. Streletsky in solving the problem of the stock factor, taking into account the variability of the main parameters for the proposed designs. Prior to calculations on the basis of a probabilistic approach in engineering practice it was usually assumed that the stock ratios are a special number endowed with nature by some exceptional properties. It was assumed that the exact observance of it ensures the reliability of structures, while even a slight decrease in it entails a danger to the construction. However, for the compiler of the norms of calculation, the stock factor has always remained a generalized reflection of precautionary measures that provide a generally satisfactory level of security.

The choice of the value of the stock factor for buildings of different types became increasingly differentiated over time. For example, in a road bridge, the load distribution depends on the location of cars at different points along the width of the roadway, and in the railway bridge loads are distributed only in places where laid rails are laid. The expected load on the railway bridge is close to reality, since the train always moves along the line of account, which does not occur when driving on a highway bridge. Therefore, in calculating the design of a road bridge, the coefficient of the stock of strength is considerably greater than that of the railroad. At the same time, the calculation of structures for permissible stresses or on the limiting load deals with a single factor of the stock irrespective of the working conditions of the structural elements and almost regardless of the types of loads. Analyzing this question, Professor M. Streletsky in the 40 years of the twentieth century clearly formulated the idea of a separate analysis of the variability of loads and strength of materials and their separate consideration in the norms – an idea that was the basis of the method of calculating the boundary states.

Keywords: building mechanics, resistance of materials, boundary state, coefficients of strength, M. Streletsky

Рецензенти:

Казьмирчук Г.Д., д.і.н., професор

Тихонов А.К., д.і.н., професор

М.С. Стрелецький зазначав, що було б дуже доцільним, щоб Міжнародна Рада з будівництва зацікавилася даними питаннями.

ДЖЕРЕЛА ТА ЛІТЕРАТУРА:

1. Стрелецкий Н.С. Метод расчета конструкций зданий и сооружений по предельным состояниям, применяемым в СССР, и основные направления его развития / Н.С. Стрелецкий // Стрелецкий Н.С. Избранные труды / Под ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1975. – С. 242-256.
2. Лопатто А. Артур Фердинандович Лолейт: К истории отечественного железобетона / А. Лопатто. – М.: Стройиздат, 1969. – 104 с.
3. Артур Фердинандович Лолейт // Русские архитекторы и строители. – М., 1952. – С. 125-130.
4. Гвоздев А.А. А.Ф. Лолейт / А.А. Гвоздев // Строитель. – 1933. – № 12. – С. 5-6.
5. Михайлов К.В. Алексей Алексеевич Гвоздев / К.В. Михайлов, Г.К. Хайдуков. – М.: НИИЖБ, 1997. – 73 с.
6. Эстрин С. Выдающемуся ученому-строителю А.А. Гвоздеву – 110 лет / Сергей Эстрин // Весь бетон. – 2008. – 8 октября.
7. Хоциалов Н.Ф. Запасы прочности / Н.Ф. Хоциалов // Строительная промышленность. – 1929. – № 10. – С. 840-844.
8. Баженов В.А. Будівельна механіка і теорія споруд. Нариси з історії / В.А. Баженов, Ю.В. Ворона, А.В. Пельмутер. – К.: Каравела, 2016. – 428 с.