

## ТРАНСФОРМАЦИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ

**Р**асчет конструкций по расчетным предельным состояниям, который является достижением отечественной строительной науки, внедрен в Евростандарт под названием «метод частных коэффициентов надежности». В философии подобная ситуация есть предметом теории психофизического параллелизма. Разрешение параллелизма и восприятие двух методов дается в работе ведущего ученого в теории расчета строительных конструкций А.В. Перельмутера [1]. Рассмотрим трансформацию формализации метода предельных состояний с позиции философских категорий *содержание и форма*, не вдаваясь в философскую глубину единства и противоположности этих категорий, на примере расчета деревянных конструкций.

### Расчет конструкций по допускаемым напряжениям.

Формулировки *метод расчета по допускаемым напряжениям* официально не существовало. В нормах и технических условиях проектирования деревянных конструкций (ГОСТ 9000-1-38 и в п. 8 гл. II Инструкции по проектированию деревянных конструкций) говорится, что «При разработке проекта надежности следует руководствоваться приводимыми ниже НиТУ проектирования деревянных конструкций в части материалов и допускаемых напряжений». Автор сохранил определения и терминологию Инструкции.

В гл. II Инструкции приведены обозначения и значения основных допускаемых напряжений воздушно-сухой сосны в конструкциях возводимых сооружений:

- 2-го класса – из лесоматериала отборного сорта;
- 3-го класса – из лесоматериала первого сорта;
- 4-го класса – из лесоматериала второго сорта.

Разделение по классам и сортам не отразилось на количественных значениях допускаемых напряжений. Содержались достаточно жесткие требования к качеству пиленого лесоматериала в зависимости от сорта, а именно: наличие, расположение и размеры пороков – сучков, трещин, косослоя, свилеватость (не допускалась), сердцевина.



**В.З. Клименко**  
профессор кафедры металлических и деревянных конструкций Киевского национального университета строительства и архитектуры, к.т.н., профессор

*Поправочные коэффициенты к основным допускаемым напряжениям.* При наличии в центральном- или внецентренно-растянутых элементах ослаблений, помимо учета ослаблений сечения и изгибающего момента, допускаемые напряжения снижаются умножением на коэффициент  $k_p$ , принимаемый в зависимости от вида ослабления равным от 0,6 до 0,9.

В зависимости от влажности применяемого лесоматериала и условий эксплуатации конструкций допускаемые напряжения умножают на поправочные коэффициенты от 1,0 до 0,7 для защищенной и незащищенной древесины.

При расчете временных сооружений допускаемые напряжения могут быть увеличены на 20 %.

Для гнутых элементов допускаемые напряжения снижаются умножением на коэффициенты в зависимости от отношения  $R/a$  ( $R$  – радиус кривизны,  $a$  – размер сечения одной изгибаемой доски в направлении радиуса).

*Проектирование и расчет элементов деревянных конструкций.* При конструировании элементов следует по возможности избегать использования работы дерева на растяжение поперек волокон.

Расчет элементов по допускаемым напряжениям заключался в проверке условия

$$\sigma_i \leq [\sigma_i]. \quad (1)$$

*Растянутые элементы*

$$\frac{N}{k_p F_{HT}} \leq [\sigma_p]. \quad (2)$$

*Растянуто-изогнутые элементы*

$$\frac{N}{k_p F_{HT}} + \frac{M}{W_{HT}} \leq [\sigma_p]. \quad (3)$$

*Сжатые стержни.* Централно-сжатые стержни помимо расчета на простое сжатие (по площади нетто) должны проверяться на продольный изгиб

$$\frac{N}{F} \quad [ \text{с} ]. \quad (4)$$

*Сжато-изогнутые стержни.* Расчет в плоскости изгиба

$$\frac{N}{F_{HT}} + \frac{M}{W_{HT}} \quad [ \text{с} ] \quad (5)$$

$$\text{при} \quad = 1 - \frac{1}{100} \left[ \frac{\epsilon}{\text{с}} \right]. \quad (6)$$

Анализ расчета по Инструкции сделан в [2].

*Проектирование и расчет деревянных конструкций (раздел 4).*

*Настилы и балки.* Нормальные напряжения в случае простого изгиба проверяются по формуле

$$\frac{M}{W_{HT}} \quad [ \text{у} ]. \quad (7)$$

При наличии сосредоточенных нагрузок вблизи опор необходимо проверять скалывающие напряжения по формуле

$$\frac{QS_{бр}}{J_{бр} \beta} \quad [ \text{л} ]. \quad (8)$$

Расчет по допускаемым напряжениям выполнялся по формулам сопротивления материалов с учетом особенностей расчета (небольших в рассмотренном нормативном документе) реальных деревянных элементов.

В расчете по допускаемым напряжениям коэффициент находился с учетом коэффициента запаса  $k_3$ , на который умножалось продольное усилие  $N$ , и формула (6) получена из

$$= 1 - \frac{k_3 N}{N_{\text{э}}} = 1 - \frac{1}{\text{э}} \frac{N}{A [ \text{с} ]}, \quad (9)$$

где  $N_{\text{э}}$  – критическая сила по Эйлеру.

В расчете по допускаемым напряжениям для перехода от усилий разрушающих к допускаемым вводили коэффициент запаса. Его наличие создавало видимое представление о надежности конструкций и получило название – коэффициент незнания.

### *Исторический экскурс<sup>1</sup>.*

В середине 19 ст. один из основоположников русской школы мостостроения С.В. Кербедз возглавил проектирование и строительство металлического моста через р. Лугу на Петербурго-Варшавской железной дороге. На этой же линии по его инициативе возводились железные балочные мосты при пересечении малых водотоков. Все это было делом новым, поэтому возникла потребность в проведении специальных испытаний стальных балок мостов на прочность. В октябре 1852 г. С.В. Кербедз разработал проект норм допускаемых напряжений на растяжение и на сжатие для стали, согласно которым «полное сопротивление» (видимо, временное) стали на растяжение принималось равным 3200, а на сжатие – 2555 кг/см<sup>2</sup>. Допускаемые напряжения в отдельных частях мостов были приняты следующими: для малых мостов и поперечных балок всех мостов – 1/6 временного сопротивления, для раскосов ферм больших мостов, которые непосредственно подвержены действию нагрузок, – 1/5 временного сопротивления, для верхнего и нижнего поясов ферм или балок – 1/4 временного сопротивления. Кроме того, «по причине влияния холода» допускаемое напряжение было уменьшено еще на 1/10.

В соответствии с проектом норм специальная комиссия 21 ноября 1852 г. провела испытание двух сплошных стальных балок, связанных между собой, при ширине между подкладками 6,1 м, четырьмя поперечными железными связями. При этом считалось, что полное сопротивление малых мостов должно в шесть раз превышать наибольший груз от подвижной нагрузки. Опыты, проведенные над балками с нагрузкой, в шесть раз превышающей подвижную нагрузку, показали, что средние части балок сохранили совершенно вертикальное положение и никаких признаков разрушения в этих частях балок не было обнаружено. На этом основании комиссия установила: «...приняв в соображение, что главное сопротивление такого рода сплошных железных балок сосредоточено в несжимаемости верхнего и нерастяжимости нижнего поясов, толщина 5/16 дюйма может быть принята и для мостов с балками, большими нежели 20 фут (6,1 м) отверстиями, с тем, чтобы, сооб-

<sup>1</sup> Материал взят из книги М.И. и М.М. Ворониных «Станислав Вячеславович Кербедз» [Л.: «Наука», 1982 г.] со ссылкой на «Проект постоянного моста через р. Неву. Записка к проекту». 1841. Рукопись. Библиотека ЛИИЖТа. Л. 1–80 обл., 5 л. Черт.

разно отверстие, сжатие и растяжение верхнего и нижнего поясов, при полной нагрузке моста, не было бы более 1/6 части полного сопротивления сжатию и растяжению железа, из которого будет устроен мост, а также чтобы между балками было положено достаточное для устойчивости мостов число поперечных связей».

Испытание стали для ферм мостов через р. Лугу производилось на сидерометре Александровского механического завода. Так были созданы первые расчетные нормы нагрузки для металлических мостов. Конечно, позже они были заменены другими, однако первые нормы представляют собой важный этап в истории науки и техники.

#### **Расчет конструкций по расчетным предельным состояниям.**

*Идеология метода.* Расчет элементов и соединений по несущей способности – прочности или устойчивости – производится по наибольшей нагрузке и по наименьшему сопротивлению материалов. Новый метод исключает коэффициент запаса. Отличие метода предельных состояний от расчета по допускаемым напряжениям не только в этом. Идеологическое содержание метода и важность усвоения его идеологии рассмотрены в [1]: «Практикующие инженеры-проектировщики дисциплинированно исполняют предписания действующих нормативных документов, которые основаны на методе предельных состояний, и, казалось бы, никакой проблемы нет. Но в любой мало-мальски нестандартной ситуации, когда прямые рекомендации норм отсутствуют, оказывается, что практики недостаточно знакомы с идеологическими основами метода...».

Остановимся на математической формализации метода предельных состояний с соблюдением требований математической логики и семиотики, исходя из обязательного условия единства содержания и формы.

*Математическая формализация метода предельных состояний.* Идеология метода отражена в математической его формализации в виде неравенства для первого предельного состояния

$$n_{fd} [a_i F_i(T)] \leq AR_c(T) \quad (10)$$

где  $n_{fd}$  – коэффициент ответственности, назначаемый в зависимости от степени ответственности проектируемого объекта;  $fd$  – коэффициент надежности модели, учитывающий неоп-

ределенность расчетной схемы; – коэффициент сочетания нагрузок, определяемый из условия равнонадежности конструктивных элементов;  $a_i$  – коэффициент влияния  $i$ -й нагрузки;  $F_i(T)$  – соответствующее рассматриваемому предельному состоянию расчетное значение  $i$ -й нагрузки;  $A$  – геометрическая расчетная характеристика поперечного сечения элемента соответственно виду деформаций (напряжений);  $R$  – расчетное сопротивление материала соответственно виду деформации;  $c(T)$  – коэффициент условий работы, учитывающий фактические условия эксплуатации. Для элементов из разных материалов и при разных деформациях в них сочетания коэффициентов  $c(T)$  различного из их общей номенклатуры;  $rd$  – коэффициент, учитывающий возможные неточности (геометрические, в свойствах материалов и прочее).

Автор привел формулу из [1] в связи с тем, что формула (10) отвечает современному физическому содержанию первого предельного состояния с позиции надежности конструкций. В этом эволюционность метода предельных состояний.

Принципиальное отличие метода предельных состояний от расчета по допускаемым напряжениям заключается в том, что в нем выполняется проверка несущей способности элемента, соединения, а не отдельных поперечных сечений по допускаемым напряжениям.

В расчетах элементов и соединений конструкций общая формула метода предельных состояний (10) приобретает детерминированный вид соответственно работе элементов и соединений с соблюдением условия

$$N \leq N_{rd} \quad (11)$$

в котором  $N$  – расчетное усилие;  $N_{rd}$  – несущая способность элемента, соединения.

*Расчет элементов деревянных конструкций.* После внедрения метода предельных состояний в СНиП II-Б.5 «Деревянные конструкции зданий и промышленных сооружений» и в НИТУ 122-55 «Нормы и технические условия проектирования деревянных конструкций», а также в учебной литературе [3] математическая запись расчетных формул соответствовала пособию Коченова В.М. «Расчет деревянных конструкций по расчетным предельным состояниям» под ред. Г.Г. Карлсена, т.е. соблюдалось единство идеологии метода и математической ее форма-

лизации. Учитывая, что современному поколению студентов и специалистов эта формализация неизвестна, напомним расчет элементов по первому предельному состоянию согласно СНиП II-Б.5.

*Центрально-растянутые элементы*

$$N \leq m_c R_p F_{нт} \quad (12)$$

*Внецентренно-растянутые элементы*

$$\frac{N}{m_p F_{нт}} + \frac{0,77 M}{m_u R_u} \leq R_p \quad (13)$$

*Центрально-сжатые элементы*

$$N \leq m_c R_c F_{нт}; \quad N \leq m_c R_c F_{рас} \quad (14)$$

*Внецентренно-сжатые элементы*

$$\frac{N}{m_c F_{нт}} + \frac{M}{m_c W_{нт}} \leq R_c \quad (15)$$

$$\text{при } \alpha = 1 - \frac{2}{3100} \frac{N}{F_{бр} R_c} \quad (16)$$

*Изгибаемые элементы*

$$M \leq m_u R_u W_{нт} \quad (17)$$

с коэффициентом условий работы  $m_u$  от 0,85 до 1,15.

*На скалывание древесины*

$$Q \leq m_{ск} R_{ск} \frac{J_{бр} h}{S_{бр}} \quad (18)$$

В пособии Коченова В.М. в примерах расчета проверка несущей способности элементов и соединений выполнялась по условию (11).

**Трансформация расчета конструкций по методу предельных состояний** вынуждает обратиться к философскому понятию термина *метод*. Метод (греч. *methodos* – буквально «путь к чему либо») – в самом общем значении способ достижения цели... средство познания, есть способ воспроизведения в мышлении изучаемого предмета. Сознательное применение научно обоснованных методов является существенным условием получения новых знаний... метод есть движение самого содержания и поэтому не может разрабатываться вне связи с содержанием. Ученье о методе научного познания – есть методология. Методология опирается на диалектику предмета и на специфику ее отражения в мышлении.

То, что произошло с методом предельных состояний, целиком и полностью не отвечает понятиям «метод» и «методология».

В СНиП II-В.4-71 «Деревянные конструкции, нормы проектирования» в п. 3.7 говорится: «Расчет деревянных конструкций производится по двум группам предельных состояний: по предельному состоянию первой группы (по несущей способности);...»

Дальше в гл. 4 расчет элементов выполняется не по условию (11), а по следующему условию:

$$\sigma_i \leq R_i \quad (19)$$

отличному от условия расчета по допускаемым напряжениям (1) наличием в правой части немногочисленных в то время коэффициентов условий работы.

СНиП II-25-80 «Нормы проектирования. Деревянные конструкции» в п. 1.3 гласит: «Деревянные конструкции должны удовлетворять требованиям расчета по несущей способности...». Далее в гл. 4 расчет элементов выполняется не по условию (11), а по условию (19) с более расширенной системой коэффициентов условий работы по сравнению с предыдущими нормами.

Не соответствующая с методологической позиции формализация метода предельных состояний в нормативных документах отразилась и в учебной литературе. В [4] и [5] приводятся основы метода предельных состояний с его формализацией по условию (11), но при этом расчет элементов выполняется по условию  $\sigma_i \leq R_i$ , а не по формулам (12)÷(18).

В учебнике [6] основы расчета элементов рассмотрены с позиции метода предельных состояний: «Проф., д.т.н. Н.С. Стрелецкий сформулировал основной принцип всякого инженерного расчета, который состоит в том, чтобы было соблюдено условие неразрушимости». Математическая формализация условия не приведена и расчетные формулы даны в виде  $\sigma_i \leq R_i$ .

В нормах проектирования и в учебной литературе по деревянным конструкциям почти исчезла идеология метода предельных состояний<sup>2</sup>. Система коэффициентов условий работы – то, что отличает метод предельных состояний от расчета по допускаемым напряжениям с коэффициентом запаса – не раскрывает идеологию

2 Это касается расчета не только деревянных конструкций, но и металлических. В учебниках, изданных в последние годы, расчет по предельным состояниям только декларируется, а выполняется расчет по условию  $\sigma_i \leq R_i$ .

метода, отраженную в формуле (10). В такой ситуации разрешение психофизического параллелизма происходит скорее в сторону признания нового названия расчета – метод частных коэффициентов надежности, чем сохранения старого названия – метод предельных состояний. В новом названии с объяснением физического содержания каждого частного коэффициента может быть оправдано использование формул сопротивления материалов взамен формул (12) ÷ (18). Физическая суть расчета сохраняется, а значит – сохраняется идеология, и это способствует формированию у студентов технического мировоззрения, а не механического использования математического аппарата. Однако сохранение старого названия расчета в сочетании с формулами сопротивления материалов – это нарушение единства содержания и формы. Такого в нормативной и учебной литературе быть не должно.

Вернемся к философии: во взаимосвязи  $C$  и  $\Phi$  содержание представляет ведущую, определяющую сторону предмета, а  $\Phi$  – ту сторону, которая модифицируется, изменяется в зависимости от изменения содержания. В свою очередь  $\Phi$ , обладая относительной самостоятельностью, оказывает обратное активное влияние на  $C$ :  $\Phi$ , соответствующая  $C$ , ускоряет его развитие, тогда как  $\Phi$ , переставшая соответствовать изменившемуся  $C$ , тормозит дальнейшее его развитие.

Представляется, что использование расширяющейся и углубляющейся по физическому содержанию системы коэффициентов надежности в условии (10) сохранило бы содержание метода предельных состояний с его идеологией.

Использование тех же уже частных коэффициентов в расчетах элементов по условию (19) не соответствует содержанию метода предельных состояний.

В [7] автор, не вспоминая ни первого, ни второго названия расчета деревянных конструкций, ввел понятие базовые расчетные сопротивления, установленные при нормальных лабораторных условиях. Фактические расчетные сопротивления древесины в каждом деревянном элементе конструкций находятся с учетом реальных условий эксплуатации, изменения прочности, появления собственных внутренних напряжений, ответственности объекта и прочее. Учет осуществляется системой соответствующи-

щих коэффициентов (их определение не дано, но и не применены определения – условия работы или надежности). В общем виде расчетные фактические сопротивления находятся таким образом:

$$R_i^{\Phi} = R_i^6 m_b m_t m_q m_u m_o m_{sh} m_{gn} m_o m_a / V_n . \quad (20)$$

Номенклатура коэффициентов  $m$  и их комбинаторика при некоторых обязательных разная для каждого элемента. Это обеспечивает равнопрочность элементов. Равнопрочность – составляющая идеологии расчета, обеспечивающая проектную надежность конструкций.

Таким образом, можно констатировать, что в СНиПах 1972 и 1982 годов отсутствует содержательная идеология. Условие (10) в виде детерминированных формул типа (11) оказалось непривычным и неудобным в инженерных расчетах по сравнению с хорошо известными формулами сопротивления материалов. Проверка условия (10) при переборе геометрических характеристик поперечного сечения элементов в соответствии с сортаментами требует определенного ручного труда и затрат времени.

Причина серьезная, но успешно решаемая при автоматизации расчетов даже не с помощью компьютерных программ, а с использованием автоматизированных калькуляторов. Однако устранение ее за счет лишения метода идеологии представляется иррациональным. Сохранение идеологии – системы взглядов – важнее технических трудностей расчета.

Изменения, произошедшие с методом предельных состояний, не являются его модификацией. Произошла, по мнению автора, скорее деградация метода. Расчет элементов по условиям (19) содержит мало признаков метода предельных состояний с позиции его идеологии. С методологической позиции такая интерпретация метода в нормах и учебной литературе не желательна, она не способствует формированию технического мировоззрения, а содержит только арифметический расчетный аппарат.

**Сохранение идеологии метода предельных состояний.** В упомянутом выше учебном пособии (7) нет идеологии метода, как нет и самого метода. При разработке национального нормативного документа по деревянным конструкциям автор высказал свое видение метода предельных состояний с его гармонизацией с методом расчета по Еврокоду 5.

В стандарте [8] расчет элементов деревянных конструкций по предельному состоянию первой группы представлен в следующей редакции.

Условие обеспечения безотказности элемента согласно [9] определяется через функцию  $S$  (эффект загрузки, расчетное усилие) и  $R$  (несущая способность элемента) в виде

$$S(G_d, f_d, T_{ed}) \leq R(f_d, a_d, r_d, T_{ef}), \quad (21)$$

однотипному условию (10).

Для каждого элемента условие (21) записывается формулой сопоставления напряжений с расчетным сопротивлением в виде

$$\sigma_d = \frac{q(G_d T_{ed})}{q(a_d)} \cdot \frac{f_d}{n}. \quad (22)$$

Формула (22) устанавливает связь между формализацией предельного состояния (21) и его идеологией с расчетными формулами стандарта для проверки прочности расчетных поперечных сечений элемента

$$\sigma_{i,d} \leq f_{i,d}, \quad (23)$$

в которых фактическое расчетное сопротивление материала каждого элемента находится по

формулам для цельной и клееной древесины, однотипным формуле (20).

В инженерной практике уже давно пользуются приемом трансформации формул типа (23) к виду для решения обратной задачи: подбора поперечного сечения. После уточнения размеров поперечного сечения, согласно действующим сортаментам, условие предельного состояния (21) выполняется.

**Вывод.** Поскольку физическое содержание двух расчетов элементов и их формулировка разные, то и формулировки должны быть разные. По условию (10) – метод предельных состояний, по условию (19) – метод частных коэффициентов. Второй метод не является модификацией первого и они должны функционировать самостоятельно, а не в виде неопределенного симбиоза в форме условия (19) с частными коэффициентами и называться методом предельных состояний.

Отсутствие диалектической связи между физическим содержанием и идеологией метода с его математической формализацией не способствует формированию технического мировоззрения у пользователей норм.

[1] Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций/К.: Изд-во УкрНИИПроектстальконструкция, 1999. – 212 с.

[2] Клименко В.З. Розрахунок елементів із деревини на поздовжньо-поперечний згин//Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2013. – № 3. – С. 39–45.

[3] Иванов В.Ф. Деревянные конструкции. Учебник/Л.: – М.: ГСИ, 1956. – 316 с.

[4] Клименко В.З. Конструкции из дерева и пластмасс. Учебник/Иванов В.А., Клименко В.З. К.: Вища школа, 1983. – 279 с.

[5] Клименко В.З. Конструкції з дерева і пластмас. Підручник/К.: Вища школа, 2000. – 304 с.: іл.

[6] Конструкции из дерева и пластмасс: Учебник/ Под ред. Г.Г. Карлсена и Ю.В. Слицоухова. – 5-е изд. – М.: СИ, 1986. – 543 с., ил.

[7] Клименко В.З. Проектування дерев'яних конструкцій. Навч. посібник/К.: ІЗМН, 1998. – 432 с.

[8] ДСТУ-Н Б В. 2.6 -184:2012 Конструкції з ціЛЬНОЮ і клеєНОЮ деревини. Настанова з проектування. – К.: Мінрегіон України, 2013. – С. 119.

[9] ДБН В.1.2-14-2009 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. – К.:Мінрегіон України, 2010.

Надійшла 06.03.2014 р.