

Перельмутер А.В.

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

**Субъективные заметки о содержании предмета,
преподавании и понимании результатов
компьютерного анализа**

Электронное издание

Киев - 2024

© А.В.Перельмутер, 2024

За более чем шестидесятилетнюю профессиональную работу автор с грустью наблюдал развитие все большей разобщенности различных разделов единой науки о законах силовой работы несущих строительных конструкций, за тенденцией создания в ней отдельных «научных хуторов». Оправдываясь спецификой поведения и особенностями физико-механических свойств материала, отдаляются друг от друга учения о железобетонных, металлических и деревянных конструкциях, учения, все дальше уходящие от строительной механики.

Эта разобщенность привела к тому, что между отдельными дисциплинами образовались не вошедшие в программу инженерного образования разрывы, например, такие как особенности нагрузок и воздействий, под влиянием которых работает конструкция, или методы испытания сооружений. А с другой стороны возникает дублирование в изложении такого общего приема расчета, как метод предельных состояний, излагаемый совершенно формальным образом, поскольку проблема обеспечения надежной и безопасной работы сооружения затерялась среди абсолютно рецептурных способов расчета по нормам проектирования.

Термин «Теория сооружений» автор понимает в расширительном смысле, полагая, что сюда относятся не только вопросы расчетного анализа работы конструкции под нагрузкой, но и те смежные проблемы, к которым исследование работы сооружения приводят. В частности это относится к общим закономерностям формообразования той или иной группы конструктивных решений, к проблемам обеспечения их надежности и безопасности, к обратным задачам строительной механики и т.п.

В предлагаемой работе представлены субъективные заметки, касающиеся затронутой проблемы. Они во многом фрагментарны, но, отдавая их на суд читателя, автор надеется, что найдет последователей, которые пожелают продолжить исследования.

Возможно, что некоторые из представленных ниже заметок покажутся отражением известной для пожилых людей парадигмой: «раньше было лучше». Нет не лучше, а гармоничнее, поскольку и направление научно-технической мысли, и высшее образование соответствовали как классу применяемых конструкций (упругие стержневые системы), так и используемому аппарату анализа (аналитические разработки при ограниченных возможностях ручных вычислений).

Сегодня и конструктивные решения (оболочки, вантовые системы и др.), и класс решаемых задач (нелинейное деформирование, оптимизация, преднапряжение и многое другое), и ставшие принципиально другими вычислительные возможности не всегда соответствуют устоявшейся традиции считать главным совершенствование методики расчетов. Представляется, что главным направлением исследований сегодня становится анализ особенностей поведения и основанное на этом анализе синтетическое направление. Соответственно должна меняться и целевая установка высшего образования.

Нет ничего тяжелее, чем преодолеть груз правильного, но слишком частного знания; пересмотреть традиции своих предшественников — это наибольшая оригинальность, которой может достичь человек.

К. Труделл

Введение

В литературе о строительных конструкциях наблюдается заметный перекосяк в сторону чисто рецептурных подходов в ущерб аналитическим. В большинстве специальных публикаций детально описываются принятые конструктивные решения и приводятся указания по их применению, но необычайно редко приводится аргументация, обосновывающая выбор именно такого, а не другого конструктивного решения.

Имеются и многочисленные работы с описанием различных приемов расчета и результатов расчетного анализа тех или иных конструкций, но в них исследуемая конструктивная форма считается некоторой данностью. В результате таких публикаций накапливается разрыв между эмпирическим и теоретическим знанием.

Наконец, следует указать на недостаточную взаимосвязь тех разделов инженерной подготовки, которые входят в цикл дисциплин прочностного анализа (теоретическая механика, сопротивление материалов, строительная механика), и разделов, относящихся к конструированию (металлические, железобетонные, каменные и другие конструкции), когда при рассмотрении последних результаты первых рассматриваются как сугубо вспомогательные. Тем самым убивается такая комплексная дисциплина, как теория сооружений, понимаемая в первоначальном смысле как учение о поведении сооружений.

В пояснительной записке великого Леонардо да Винчи (почти 500-летней давности) к его проекту купола для Миланского собора, адресованной тогдашним городским властям (потенциальным заказчиком проекта купола) он писал [25]:

— Синьоры, отцы депутаты! Как врачам, попечителям и целителям больных тел надлежит разобраться в том, что есть человек, что есть жизнь, что есть здоровье и каким образом равенство и согласие элементов сохраняет его и несогласие их разрушает его и губит, только так, выяснив хорошо высказанное обстоятельство, они могут восстанавливать здоровье у тех, кто его лишен...



Леонардо да Винчи
(1452-1519)

...То же нужно и сооружению, т. е. врач-архитектор, который бы хорошо понимал, что есть здание, и от каких правил зависит правильная постройка, и откуда эти правила берутся, и на сколько причин они делятся, и каковы причины, держащие здание как единое целое и делающие его прочным, и какова природа тяжести, и каким образом тяжести должны быть сплетены, связаны вместе, соединены, и какие они действия рождают; и тот, кто будет обладать настоящим знанием этих вышеозначенных вещей, оставит нас удовлетворенными своими рассуждениями и работами.

Эти слова Леонардо любил цитировать И.М. Рабинович, когда начинал читать свой курс теории сооружений [52], обращая особое внимание на концепцию цельного восприятия поведения сооружения, которая подчеркивается сопоставлением «что есть человек, что есть жизнь, что есть здоровье». Здесь не зря сказано о курсе *теории сооружений*, вместо которого иногда говорят о строительной механике.

Однако, строительная механика занимается преимущественно расчетом систем, расчетная схема которых задана и ее параметры точно определены, но не охватывает других теоретических проблем, связанных с проектированием сооружений.

В свое время профессор Павел Апполонович Велихов (дед известного физика-теоретика, академика Евгения Павловича Велихова) назвал свой курс *учением о жизни сооружений* [21].

Важной особенностью хорошего курса теории сооружений явилась бы ориентация не только на детальный анализ поведения конструкции, но и на описание общей картины ее поведения, того общего взгляда на проблему, о которой речь шла в приведенной выше цитате Леонардо да Винчи. Именно такой подход лежит в основе, так называемого, концептуального проектирования.

Термин «концептуальное проектирование» обозначает проектирование, вытекающее не из конкретных расчетов определенного сооружения на заданную систему нагрузок, а общие правила, вытекающие из обобщения инженерного опыта, понимания физических механизмов работы сооружения и общего взгляда на предъявляемые к нему требования.

Концептуальные положения, в отличие от методик расчета, определяют подход к постановке задачи, будь то научное исследование или же практическая проблема выбора того или иного решения. А критический анализ происхождения и обоснования концептуальных положений чаще всего требуется при решении задач, возникающих в нестандартных ситуациях, когда правила и приемы, отработанные для случаев массового



И.М. Рабинович
(1886-1977)

строительства и для обычных условий работы сооружений, входят в противоречие с новыми условиями.

Устоявшиеся концепции, приемы и подходы фиксируются в правилах и нормах проектирования, их происхождение зачастую забывается, а через некоторое время они начинают восприниматься как истина в последней инстанции. Образуется ситуация, когда положения норм воспринимаются в качестве источников знания, а не наоборот, когда знание порождает нормативные указания. И эти обстоятельства толкают к решению нестандартных задач стандартными методами. Для преодоления этой тенденции необходимо знание тех положений, которые положены в основу «обычного» подхода, и, что самое главное, четкое понимание границ их применения, что заставляет возвращаться к истокам.

Строительная механика - это искусство моделировать материалы, работу которых мы не понимаем, в геометрических формах, которые мы не можем в точности проанализировать, под воздействием сил, которые нам неизвестны, причем делать это так, чтобы ни у кого не возникло никаких подозрений.

Permelee R.A.

Теория сооружений и строительная механика

Что такое, в конце концов, “теория сооружений”? Здесь речь идёт не только о теории, не только о методах вычисления, а скорее о теории и методах плюс их применение к реальным несущим нагрузку конструкциям, и, в первую очередь, к строительным конструкциям. На многих языках иногда трудно определить такую широкую область строго и, прежде всего, кратко. Например, немецкий термин *Baustatik* (буквально “строительная статика”) является слишком узким. И даже английское выражение *Structural Analysis* (анализ сооружений) не передает смысл целиком и точно, потому что это не только анализ, но также и синтез полной картины в создании несущей конструкции.

До 50-х годов XX века в отечественной научной и учебной литературе термина-названия «Строительная механика» не было. Было лишь название «Теория сооружений». Изменение самоназвания этой прикладной науки свидетельствовало о заметной переориентации первого (синтетического) направления в сторону второго (аналитического), когда инструментальная сторона анализа работы сооружения под нагрузкой стала важнее, чем понимание особенностей ее поведения.

Исторически становление и развитие науки о прочности шло одновременно в двух направлениях: теория сооружений и механика деформируемого твердого тела (механика упругой среды).

Теория сооружений возникла и развивалась, исходя из потребностей практики, связанных с развитием промышленности и техники, и особенно из необходимости понимать и использовать способы сопротивления сооружений внешним воздействиям. Можно отметить, что многие ее создатели (Л. Навье, Д.И. Журавский, Ф.С. Ясинский, А. Кастильяно, О. Мор, А. Фепль, Е.О. Патон, Н.С. Стрелецкий) были не только исследователями, но и практикующими инженерами.

Механика упругой среды и аналитическая механика изначально были связаны с разработкой и развитием теории, физико-математических моделей упругой среды, с методами получения и решения уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние этой среды. По сути она развивалась как одно из направлений познания законов природы.

Хронологически оба эти направления неразрывно связаны друг с другом, они развивались и взаимно обогащали друг друга идеями и методами решения задач. Но при этом развитие инструментов анализа и все большая их математизация постепенно выходили на первый план, отрывая второе направление от инженерных истоков, а границы с другими техническими дисциплинами (машиностроение, судостроение, космическая промышленность, биомеханика) становятся все более стертыми, поскольку используются универсальные понятия, методы и инструменты. Так строительная механика подменила собой теорию сооружений.

Заметим, что отмеченное изменение приоритетов, по-видимому, является проявлением более общей закономерности: когда наука становится технологией, вопросы «как» заменяют собой вопросы «что» и «почему».

Сегодня строительная механика имеет, главным образом, инструментально нацеленную направленность, где основное внимание обращено на разработку эффективных методов расчета сооружений. Теория сооружений в большей мере ориентирована на анализ особенностей работы тех или иных видов несущих систем в самых разнообразных расчетных ситуациях, она является наукой с более широкими притязаниями, чем строительная механика. Можно указать на следующие проблемы, решаемые ею:

- Установление общих закономерностей поведения сооружений под влиянием внешних воздействий (собственно теория сооружений);
- Разработка методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) для наиболее распространенных расчетных моделей сооружений, в том числе формализация расчета и разработка алгоритмов для решения задач на ЭВМ (создание инструментов анализа);
- Отыскание параметров конструкции, обладающих некоторыми наперед заданными свойствами (задачи синтеза);
- Оценка работоспособности и долговечности конструкций (надежность).
- Стоит также упомянуть исследование нагрузок и воздействий на сооружения, которые во многих случаях (например, при исследовании динамического поведения) настолько тесно переплетаются с теоретическим анализом жесткостных и инерционных свойств сооружения, что провести здесь границу попросту невозможно.

Столь широкое понимание предмета давно установилось в кораблестроении. Создатель курса «строительная механика корабля» И.Г. Бубнов полагал, что основные проблемы, которыми призвана заниматься строительная механика корабля, в современной терминологии можно изложить следующим образом:

• Проблема внешних воздействий. Выявление и количественное определение величин всех воздействий на конструкцию в условиях эксплуатации и в экстремальных ситуациях.

• Проблема внутренних реакций (откликов). Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции и ее отдельных частей при возможных внешних воздействиях.

• Установление допустимых величин параметров НДС (либо предельных величин внешних воздействий), позволяющих обеспечить безопасность и надежную эксплуатацию с приемлемыми условиями экономичности.

Отдельные проблемы чаще всего взаимосвязаны и многие опубликованные работы относятся одновременно к нескольким из указанных выше направлений. Кроме того следует отметить сильное пересечение проблем строительной механики с другими общенаучными дисциплинами. Не говоря уже о математике, можно указать на аэро- и гидродинамику, общую теорию устойчивости движения или на информатику.

Многие из этих дисциплин активно ведут собственную жизнь, естественно, обслуживая теорию сооружений, но зачастую сосредоточены на некоторых внутренних проблемах общенаучной направленности. Так, к теории сооружений примыкают (но по нашему мнению не входят в качестве составной части) проблемы исследования механических свойств конструкционных материалов, а также такие проблемы механики твердого деформируемого тела, как математическая теория упругости и теория пластичности, их детализация в рамках термоупругости или термоупругопластичности и т.п. Четкая граница здесь отсутствует, но в настоящем обзоре мы все же постараемся не заходить на чужую территорию.

Продолжая аналогию Леонардо да Винчи, можно сказать, что изучение анатомии соответствует теории сооружений, а исследование определенной части тела больного каким-либо заболеванием, проводимое врачом на основе его знаний по анатомии, соответствует анализу работы конкретного сооружения.

Примером «взгляда сверху» является вопрос, который профессор Кириак Самсонович Завриев любил задавать своим студентам: *«Работа несущей конструкции во многом определяется плечом внутренней пары. У фермы оно равно расстоянию между поясами, в арке — расстоянию от замка до затяжки. А каково плечо внутренней пары у оболочки двоякой кривизны на прямоугольном плане?»*



К. С. Завриев
(1891—1978)

Ответ на этот вопрос требует общего понимания работы конструкции, он направлен на понимание взаимодействия частей сооружения, а не на изучение деталей, которое иной раз уводит от рассмотрения целостной картины явления. По образному выражению А. Пуанкаре «...стал ли бы

думать какой-нибудь натуралист, что он достаточно знает слона, если бы он всегда изучал это животное под микроскопом?» [50].

Хотя часто бывает важным и внимание к некоторым деталям, особенно в тех случаях, когда с их помощью иллюстрируются общие закономерности, например, влияния изменения жесткости на перераспределение усилий, которое приведено в старом курсе железобетонных мостов академика Г.П. Передерия.

Отмечается, что в безшарнирной арке усилия и моменты растут от замка к пяте, что требует более мощного пятового сечения. Но увеличение высоты этого сечения еще в большей степени увеличивает моменты, и автор замечает — «...инженеры поняли (не все, впрочем), что нужно увеличивать не высоту, а ширину арки в пяте». Эта фраза говорит больше о работе конструкции, чем специальная методичка.



Г.П. Передерий
(1871-1953)

Полезно заметить, что Г.П. Передерий открещивался от слова «учебник», исходя из того, что так следует называть книгу, излагающую основополагающие сведения, для заучивания. Свои книги он называл «курсом», т.е.

книгами, задача которых состоит в том, чтобы научить читателя самостоятельной творческой работе.

Сегодня строительная механика имеет, главным образом, инструментально нацеленную направленность, где основное внимание обращено на разработку эффективных методов расчета сооружений.

А теория сооружений в большей мере ориентирована на анализ особенностей работы тех или иных видов несущих систем в самых разнообразных расчетных ситуациях. Основной упор здесь должен быть направлен на то, чтобы выяснить саму суть основных положений механики и этим облегчить их сознательное усвоение, как это сделано, например, в книге В.Л. Кирпичева [29]

В тематике теории сооружений присутствуют вопросы, которые мало отражены в привычных курсах строительной механики. К ним, например, относятся:

- Формирование целей и задач расчетного анализа;
- Теоретические основы метода расчетных предельных состояний;
- Оценка возможностей, эффективности и точности различных расчетных моделей применительно к тем или иным задачам проектирования несущих конструкций;
- Обратные задачи, в том числе задачи синтеза и идентификация;
- Оценка возможностей и способов управления напряженным состоянием системы;
- Исследование особенностей воздействий различных нагрузок на сооружение и создание соответствующих расчетных моделей;

-
- Методы поиска невыгодных комбинация нагружения, другие задачи связанные с поиском экстремальных расчетных ситуаций;
 - Анализ возможных схем разрушения, оценка живучести сооружений.

Столь широкий подход к проблеме указывает на необходимость корректировки содержания и методики обучения.

Компьютеризация расчетов

Компьютер вызвал коренное изменение в теории сооружений. Производимые им фактические вычисления теперь оказались в тени. Но для того, чтобы оценить результаты, как показывает опыт, требуются значительные знания об основных понятиях и методах. В фундаментальной работе [59] по этому поводу сказано: *«От расчетчика-пользователя программными комплексами, интересующегося напряженно-деформированным состоянием, не требуется детального знания всех математических, вычислительных и компьютерных проблем. Однако ему необходимо иметь представление о том, как математически формулируются задачи и что представляют собой численные методы их решения. Без этого трудно рационально выбрать расчетную схему и правильно оценить достоверность окончательных результатов».*

Компьютерная реализация расчетов и метод конечных элементов, чаще всего лежащий в ее основе, развита преимущественно в форме метода перемещений. Это обусловлено тем, что напряженно-деформированное состояние на конечном элементе проще всего выразить с помощью функций перемещений (задаваемых определенным образом) и кинематических граничных условий. При стыковке элементов удовлетворяют только уравнениям равновесия. Алгоритм решения основной задачи хорошо формализуется, что и обеспечило популярность методу перемещений.

При реализации метода сил возникают сложности формализации выбора статически определимой основной системы, описания напряженно-деформированных состояний на конечных элементах, формирования уравнений совместности деформаций.

Но в теории сооружений, ориентированной на исследование особенностей работы несущих конструкций, особый интерес представляет собой выявление «игры сил» в элементах системы — установление путей передачи нагрузки и оценка роли отдельных элементов в обеспечении работоспособности сооружения. Все эти вопросы в большей мере связаны с анализом особенностей напряженного состояния, то есть исследованием общей схемы распределения внутренних усилий, чем с исследованием картины деформирования. И тут метод сил имеет определенные преимущества, позволяя, например, изучать возможные состояния самонапряжения и оценивать возможности искусственного регулирования работы конструкции [46]. А фундаментальное понятие о самонапряженном состоянии статически неопределимой системы, его роль, свойства в явном виде не присутствуют в стандартных учебниках строительной механики, хотя и

существует практически в форме единичных напряженных состояний метода сил, т.е. как инструмент расчета, а не как свойство системы.

После появления ЭВМ строительная механика в значительной степени стала экспериментальной наукой¹, но этот факт почему-то не осознан в должной мере. Такие научные дисциплины как планирование эксперимента и статистическая обработка результатов эксперимента, методы и приемы, развитые в них, а самое главное — идеология этих дисциплин остались в стороне при стандартной подготовке инженера-расчетчика. Внешняя легкость постановки расчетного эксперимента приводит к тому, что инженеры-практики и даже некоторые исследователи ставят эти эксперименты бессистемно, а их результаты анализируются лишь частично, что не только обедняет такой подход, но и создает опасность пропуска ошибки.

Укоренилось мнение, что "хорошая программа" и проверенные на безошибочность исходные данные дают гарантию точного результата, но при этом упускается весьма существенная сторона проблемы — для какого варианта расчетной модели получен этот результат и какова степень его адекватности реальной конструкции, а не принятой расчетной модели. Оказалось, что получить ответ на эти вопросы весьма непросто и что во многих случаях для этого недостаточно развит теоретический аппарат, не говоря уже о наличии соответствующих функций используемого программного обеспечения.

В качестве еще одной важной особенности укажем на такую черту, как противоречие между кажущейся (можно сказать и действительной) легкостью использования информационных технологий в техническом творчестве и проблемой оценки результата, полученного вне зоны человеческого контроля. Человеку свойственно ошибаться, человеку, вооруженному компьютером, — не менее. И если ранее проверка на безошибочность расчетов во многом была связана с контролем над промежуточными результатами, то выдаваемое современной программной системой техническое решение (чертеж, расчет и т.п.) предстает чаще всего сразу в завершенной форме, а все промежуточные шаги, приведшие к такому решению, остаются «внутри машины».

Наиболее опытные пользователи информационных технологий давно поняли несправедливость стандартной рекламной фразы типа: «Купите нашу программу и то, что ранее у вас делал высокооплачиваемый инженер, сможет сделать простой техник». Использование компьютерного проектирования не понижает, а повышает требования к уровню квалификации людей, ответственных за использование информационных технологий. Правда, помощники таких людей, выполняющие рутинную часть работы, могут быть менее квалифицированными специалистами в той предметной области, где используется программный продукт.

Остаются справедливыми слова одного из зачинателей машинного

¹ Здесь имеется в виду вычислительный эксперимент.

расчета сооружений Р.А. Резникова: *«В прежние времена ошибки исследователей оседали на страницах научных публикаций и спокойно лежали на библиотечных полках. Появление ЭВМ позволило их тиражировать и широко внедрять в проектную практику»*. К ним можно только добавить, что анализ ошибок, тиражируемых программными средствами, стал важной частью работы научного сообщества.

Необходимо упомянуть об одной проблеме, связанной с компьютеризацией расчетов. Дело в том, что наличие все более совершенных программных систем, в которых реализованы современные методы расчета строительных конструкций, и их интерфейс, понятный даже не очень подготовленному расчетчику, породило большой контингент «пользователей-кнопкодавов». Их мало интересуют детали алгоритмов, на основе которых функционирует программная система, и они не очень понимают те теоретические положения и, что главное, ограничения и гипотезы, лежащие в основе таких алгоритмов. Ограниченность знаний не мешает им решать те или иные задачи расчета (подчас довольно сложные) и иметь твердую убежденность в правильности полученного результата (машина показала !!!).

Все эти соображения должны учитываться, если разработать специальный учебный план для магистратуры по направленности «Теория сооружений», в котором обучение в большей мере должно ориентироваться на анализ смысла, а не на технику выполнения тех или иных расчетных процедур.

Детализация и уточнение расчетов

Самое сложное в строительной механике - ее немеханическая часть. Ведь решение любой задачи требует, чтобы в первую очередь была создана ее расчетная модель, которая и будет анализироваться методами строительной механики. Вот это и является самым сложным, поскольку создание расчетной схемы - процесс не формализуемый [48]. И здесь уместно вспомнить удачную аналогию известного популяризатора математики В. Босса: *«Сбросив десяток лишних килограмм, человек выглядит лучше, живет интереснее. Так и здесь. Многие подробности мешают видеть суть»*.

На протяжении многих лет одной из основных идей проектирования была идея сближения теоретически предсказанного напряженного состояния с действительным, развитие которой обеспечивалось достигаемой точностью учета воздействий и возможностями используемой методики расчета. Точность установления напряженного состояния была доведена до высокого уровня, в особенности после массового перехода к расчетам на ЭВМ, при этом относительная «легкость» машинного расчета спровоцировала тенденцию все более детального моделирования задачи.

Расчетные схемы сегодня могут оперировать сотнями тысяч (нередко и миллионами) неизвестных узловых перемещений, и многим это

обстоятельство представляется благом, потому не первый десяток лет наблюдается тенденции все большего усложнения используемых расчетных схем и увеличения их размерности. Считается большим достижением возможность проведения расчета целого здания, да еще совместно с основанием, как единой системы, с увеличенной детализацией и с учетом большого числа подробностей.

Основные достижения теории сооружений связаны с тем, что удавалось выделить объекты с относительно небольшим числом определяющих параметров, взаимодействие отдельных частей которых было относительно слабым. Для таких систем можно сформулировать и получить детальную картину напряженно-деформированного состояния всех элементов системы. Такая концепция настолько укоренилась в расчетной практике, что она продолжает считаться единственно возможной, и без критического анализа переносится на большие системы. Но погоня за детальностью, в некотором смысле, напоминает стремление проследить за траекторией каждой молекулы в задачах газодинамики вместо исследования таких обобщающих параметров состояния, как температура и давление.

В действительности проектировщика интересует детализация только в тех областях конструкции, которые являются критическими с точки зрения прочности. И опытные проектировщики так и строят расчетную схему. Но поскольку расположение критических зон часто неизвестно, то детализируется вся схема.

Решение на компьютере все более сложных задач без предварительного анализа упрощенных моделей, дающих общее представление о работе системы, лишает проектировщика критического отношения к выбираемым конструктивным решениям.

Чтобы получить результаты, имеющие смысл и прикладное значение, расчетная модель должна быть достаточно детальной и сложной. И в то же время, она должна быть достаточно простой, чтобы можно было выполнить анализ и осмыслить получаемые результаты. В этом смысле возможности человека по переработке информации существенно ограничены. Отсюда вытекает настоятельная необходимость существенного продвижения в теории сооружений, направленного на выработку концепции, основанной на некоторых обобщенных оценках напряженно-деформированного состояния. В качестве одного из первых шагов в этом направлении можно указать на разработку методов сопоставления результатов детальных и упрощенных расчетов [48, стр. 54] или на методику отслеживания путей передачи нагрузки. Рассмотрение всей цепочки передачи сил, действующих на конструкцию, дает комплексное представление о силовой работе системы [31].

Отношение к нагрузкам и воздействиям

Нагрузки и воздействия на конструкцию обычно полагаются некими не зависящими от воли проектировщика внешними событиями, возможные опасности которых должны быть учтены в процессе принятия

конструкторских решений. Такого типа пассивное отношение к нагрузкам характерно для массового проектирования, и в рамках этой концепции основной упор делается на тщательное изучение нагрузок, прогнозирование возможности их реализации и характера проявления.

Вместе с тем имеются случаи, когда возможен (часто и желателен) другой подход, основой которого является учет того обстоятельства, что существует возможность активного влияния на нагрузку и нагрузка не просто воздействует на конструкцию, а взаимодействует с ней.

Возможность в той или иной степени изменить нагружение системы является серьезным фактором регулирования поведения и оптимизации конструктивных решений. Для этого требуется хорошо представлять, каким образом принимаемые конструктивные решения могут влиять на нагружение системы (если такое влияние имеет место) или же предусматривать специальные меры по созданию дополнительных воздействий компенсационного типа.

Одним из наиболее распространенных приемов управления нагружением является изменение давления жидкости или газа, являющихся основной нагрузкой для некоторых инженерных сооружений. Это связано с характерной особенностью нагрузок рассматриваемого типа — закон их действия на конструкцию зависит от геометрической формы той поверхности сооружения, к которой прикладываются гидростатические или аэродинамические нагрузки.

Изменение характера действия ветрового давления в зависимости от формы обтекаемой поверхности с успехом применено в целом ряде башенных конструкций, при проектировании которых удачно использовались аэродинамические свойства элементов круглого сечения.

Можно говорить также и о влиянии геометрии сооружения на нагрузки от снега, где использование простого профиля кровли и соответствующих углов наклона ее скатов уменьшает роль так называемых "снеговых мешков" или вообще снимает снеговую нагрузку.

Нагрузка ото льда, как правило, равна предельному усилию, при котором прижимаемое к сооружению ледовое поле, начинает ломаться. А усилие, необходимое для разрушения ледового поля, оказывается зависящим от формы преграды, и этот факт позволил выработать рациональные очертания мостовых опор, снижающие ледовые нагрузки.

К числу характерных примеров взаимодействия нагрузки с конструкцией относятся многие режимы динамического нагружения. Сооружение является некоторым фильтром, отбирающим из действующих на него возмущений определенную часть. Это обстоятельство хорошо исследовано, частотная картина нагружения является неотъемлемой частью описания динамической нагрузки, и анализ собственных частот и форм колебаний лежит в основе подавляющего числа динамических расчетов. Здесь появляется большое число возможностей влияния на нагрузочные эффекты путем выбора динамических характеристик сооружения. Одним из

примеров может служить проектирование зданий с гибким первым этажом, снижающее сейсмические воздействия за счет уменьшения частоты собственных колебаний.

Теория сооружений и нормы проектирования

Тот уровень детальности и точности расчета, который сегодня в массовом порядке доступен проектировщикам, вчера еще был недостижим даже для наиболее квалифицированных организаций и специалистов. Вместе с тем массовая доступность современных мощных расчетных вычислительных комплексов создает и целый ряд новых проблем. Одной из них является все увеличивающееся число нестыковок между возможностями программных систем, которые ориентированы на детальный анализ работы конструкций, и требованиями нормативных документов, формулировки которых ориентированы на устоявшийся опыт.

Другой комплекс проблем связан с тем, что современные программные системы ориентированы на использование универсальных положений таких дисциплин, как теория упругости, теория пластичности, строительная механика и т.п., в то время как некоторые положения норм основываются на упрощенных подходах, иногда снабженных эмпирическими коэффициентами, с помощью которых учитываются результаты испытаний. Но будучи представленными в нормативном документе, такие положения вдруг приобретают преимущество перед научно обоснованными, более точными решениями, не фигурирующими в нормах лишь в связи со сложностью вычислений.

Практически все современные средства автоматизации строительного проектирования в той или иной мере реализуют требования действующих нормативных документов, при этом возникают определенные проблемы технического, правового и экономического характера, связанные чаще всего с тем, что создатели нормативных документов не предусмотрели возможность (и необходимость!) их программной интерпретации.

Расчетное обоснование проектных решений - это многоэтапный процесс, в котором, как минимум, следует различать две основные части: определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и проверку принятых сечений (или армирование). К сожалению, этот факт не акцентируется и когда говорят о расчете конструкций, не всегда четко оговаривается, о чем идет речь.

Но с точки зрения нормирования различия здесь принципиальны: определение НДС является задачей строительной механики, и этот процесс в принципе не должен быть предметом нормирования, в то время как проверка несущей способности сечений является условной процедурой, ориентированной на достижение определенной меры безопасности, и здесь нормирование, то есть установление определенных требований общества, вполне уместно.

Возвращаясь к этапу определения НДС, можно сказать, что здесь

элементами нормирования могут служить только некоторые «разрешительные процедуры», с помощью которых устанавливаются допустимые упрощения задачи. Здесь важно заметить, что речь идет именно о допустимых упрощениях, а не об обязательном их применении, хотя в текстах нормативных документов эта принципиальная разница никак не оговаривается. И здесь возникает вопрос о неравноправии результатов упрощенного расчета по нормам и возможным результатом более точного анализа.

Следует заметить, что современные программные системы часто имеют возможность выполнить расчет конструкции гораздо подробнее и точнее, чем это предусмотрено нормативными документами. Могут быть установлены такие детали напряженно-деформированного состояния и такие подробности поведения конструкции под нагрузкой, которые не учитывались авторами нормативного документа или, что бывает чаще, учтены в нормах путем применения некоторого специального коэффициента условий работы или иным способом введения дополнительного запаса несущей способности. Поскольку эти приемы в нормативных документах подробно не расшифрованы, то соответствующая особенность может оказаться учтенной дважды: первый раз в рамках компьютерного моделирования и вторично при нормативной проверке, выполняемой с использованием упомянутого дополнительного коэффициента. В результате (и это случалось неоднократно) проект с более тщательным расчетным обоснованием окажется менее экономичным, чем более грубый расчет по нормам.

Здесь уместно упомянуть, что некоторые расчетные проблемы не представлены в нормах только потому, что их решения вручную невозможны, или потому, что их описание не укладывается в общепринятые рамки сложности. Например, расчетные формулы спектрального метода расчета в нормах сейсмостойкого проектирования приведены для несогласованной (диагональной) матрицы масс лишь потому, что использование согласованной матрицы масс требует векторно-матричного описания.

Еще сложнее может оказаться ситуация, когда нормативный документ предусматривает расчетную процедуру, в которой используются какие-то эмпирические поправочные коэффициенты. Типичным примером могут служить те же нормы сейсмостойкого строительства, где результаты спектрального метода расчета корректируются редуцированным коэффициентом, вводимым для учета пластической стадии деформирования и локальных повреждений и относящегося ко всей схеме.

Сказанное относится к отечественным нормам, и следует отметить, что Еврокод-8 в этом отношении сделал серьезный шаг вперед за счет введения дифференцированного коэффициента поведения и, вдобавок к этому, достаточно детального рассмотрения условий пластификации в различных конструктивных элементах системы. Одновременно следует отметить достаточно редкое для нормативных документов пояснение, что термин

«балка» относится в стержням, где приведенная продольная сила не превышает 10%.

Другим примером может служить расчет на температурные воздействия. Дело в том, что нормы проектирования конструкций устанавливают предельные расстояния между температурными швами и традиционно считается, что расчет на температурные воздействия можно не выполнять при длине отсека, не превышающем эти пределы. Но не раз было установлено, что такой расчет указывает на существенное перенапряжение несущих конструкций, что вызывает удивление и многочисленные дискуссии.

Выявленное противоречие связано с тем, что стандартные расчетные модели силового расчета не учитывают некоторой податливости узловых соединений и опорных закреплений, которые являются абсолютно несущественными при силовом нагружении, но оказываются решающими при кинематическом воздействии типа температурной деформации. Здесь нормы, опирающиеся на многолетний практический опыт, оказываются «умнее» традиционного расчета.

Реализованный в нормах проектирования метод обеспечения безотказности сооружения, основан на идее обеспечения безотказности отдельных расчетных сечений. Когда эти сечения относятся к конструктивным элементам, такой подход является точным в случае статически определимой системы или обеспечивает некоторый запас надежности для системы статически неопределимой. Величину этого запаса, как показывает накопленный опыт, в большинстве случаев можно считать приемлемой. Но как только идет речь о конечноэлементном расчете не стержневой конструкции такого типа, «локализация проверок» очень часто становится неприемлемой. Очевидно, что здесь имеется большой пробел в нормах проектирования.

Таким образом, можно констатировать: если расчетная модель, которая принимается для компьютерного анализа конструкции, не соответствует той модели, которая имела в виду при составлении нормативного документа, то возможные противоречия или неточности, нельзя разрешить без расшифровки принятого в нормах подхода. Но, к сожалению, такого рода расшифровки в нашей системе нормирования не предусмотрены.

Инженеры имеют дело не только с людьми со всеми их слабостями и прихотями, но также и с физическими явлениями. Если с людьми иногда можно спорить и в некоторых случаях их легко обмануть, то спорить с физическими явлениями бесполезно. Их нельзя третировать, их нельзя подкупить, нельзя издать против них закон, нельзя сделать вид, что чего-то никогда не было и истина совершенно в другом.

Дж, Гордон. Конструкции, или почему не ломаются вещи — М.: Мир, 1980.

Исследование закономерностей конструктивных решений

Полезно привести примеры хотя бы некоторых задач, специфических для теории сооружений. Они относятся главным образом к обобщению и анализу того огромного опыта, который накоплен при создании конструкций или даже целых сооружений определенного типа (каркасы зданий, мосты, емкостные сооружения и т.п.). По сути, каждое такое решение представляет собой результат конкретного опыта, быть может, поставленный вне заранее продуманной системы экспериментов, но отражающий данные некоторой существующей закономерности.

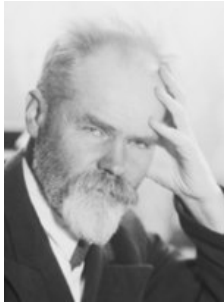
Ведь проектирование сооружения начинается с концептуальных решений, когда выбирается тип несущей конструкции, и этот этап основывается не на детальном расчете, а на качественных соображениях, лишь в некоторой степени подкрепляемых прикидочными расчетами. Именно на этом этапе используются данные о свойствах и возможностях того или иного конструктивного решения. Здесь оказываются важными, например, данные о максимально возможных пролетах, полученные А.Г. Соколовым [41].

Нужно помнить, что никакое детальное исследование работы конкретной конструкции не дает представления о свойствах присущих всем аналогичным несущим системам. А без этих сведений не может обойтись концептуальный этап проектирования, этап, где во многом предопределены успехи или просчеты выбранного конструктивного решения.

Законы веса и выбор типа конструкции

В теории сооружений важное место занимает поиск закономерностей, которыми обладают построенные сооружения различного типа. Важной

темой, исчезнувшей из современных учебников конструкций, является то, что называется «законы веса», т.е. исследование обобщенных свойств конструктивных решений различного типа.



Н.С. Стрелецкий
(1885-1967)

Проблема законов веса была выдвинута Е.О. Патоном [42] и развита Н.С. Стрелецким [58]. Исследовалась связь между показателями веса и главным параметром сооружения. В качестве такого параметра чаще всего принимается главный геометрический параметр, например, пролет. Тогда коэффициент веса (по пролету) представляет собой отношение показателя веса несущей конструкции к параметру:

$$\alpha_L = g/L. \quad (1)$$

Весьма распространен коэффициент веса по нагрузке, представляющий собой отношение веса несущей конструкции к полной нагрузке:

$$\alpha_p = g/(p+q), \quad (2)$$

где p — постоянная; q — временная нагрузка.

Весьма удобен коэффициент экономичности Резаля, представляющий собой отношение веса несущей конструкции к произведению полной нагрузки на пролет:

$$\varepsilon = g/[(p+q)L]. \quad (3)$$

Н.С. Стрелецким были высказаны и некоторые общие теоретические положения, которые были позже развиты применительно к сооружениям других типов, как самим Н.С. Стрелецким [57], так его продолжателями В.А. Балдиным [13, 14], В.М. Вахуркиным [20, 19], в частности, для сквозной конструкции Н.С. Стрелецкий предложил использовать характеристику веса

$$\chi_q = \sum_i \bar{S}_{q,i} l_i / L^2, \quad (4)$$

где $\bar{S}_{q,i}$ — усилие в i -м стержне от единичной нагрузки $q = 1$, l_i — длина этого стержня. Для ферм с параллельными поясами были найдены минимальные значения характеристик веса χ_q и оптимальные высоты для различных типов решетки [35].

Указанное направление исследований в какой-то мере является не теоретическим, а экспериментальным, поскольку можно полагать, что каждое реальное сооружение является единичным наблюдением, пригодным для исследования закономерности поведения всей совокупности однотипных конструкций.

Сам процесс проектирования в значительной степени является неформализованным экспериментом в смысле решения некоторой

конкретной задачи. Данные указанных экспериментов с отдаленных времен составили фонд для набора рациональных действий, хотя такие эксперименты, вообще говоря, приводят к случайным результатам, и время, посвященное бесполезным или неудачным экспериментам, иногда составляет сотни лет.

Анализ накопленного опыта дает важную информацию типа той, что была обработана специалистами фирмы Murphy associates [39], которые с ее использованием построили эмпирические зависимости удельного расхода стали от пролета (рис. 1), что дало возможность выявить области рационального применения той или иной большепролетной системы.

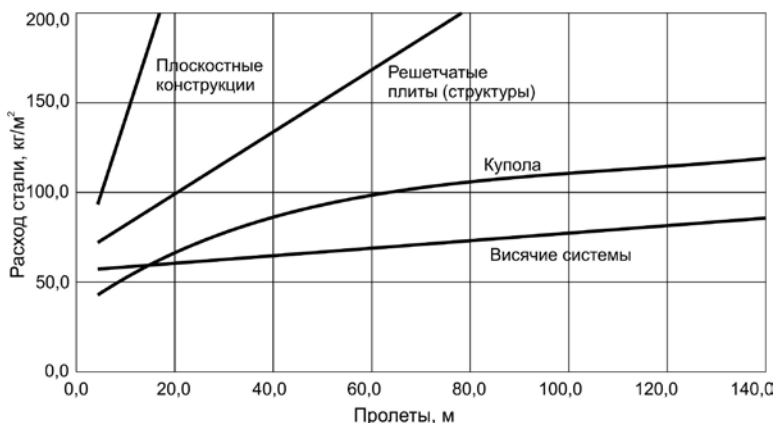


Рис. 1. Зависимость расхода стали от перекрываемого пролета

Заметным вкладом в проблему является работа П.М. Саламахина [55] где, основываясь на положениях теории размерностей, введено понятие о безразмерном весе объекта как функции также безразмерных определяющих параметров :

$$\frac{G}{EL^2} = f\left(\frac{P}{EL}, \frac{d_k}{L}, \frac{g_k L}{E}, \frac{R}{E}, \frac{l_i}{L}, \alpha_j\right). \quad (5)$$

Здесь L — основной характерный размер конструкции; E — модуль упругости; P — величина полезной нагрузки; g_k ($k=1\dots s$) — прочие нагрузки; d_k ($k=1\dots s$) — линейные размеры, характеризующие положение нагрузок на конструкции; R — параметр прочности материала; l_i ($i=1\dots n$) — прочие линейные размеры, α_j ($j=1\dots m$) — безразмерные параметры, характеризующие форму и компоновку конструкции.

Важной особенностью зависимости типа (5) является ее автомодельность. Будучи найденной для какого-то конкретного конструктивного решения, она оказывается справедливой для множества конструкций рассматриваемого класса, отличающихся используемым

материалом, размерами и нагрузками. Таким способом повышается значимость частного результата, поскольку, будучи представленным в безразмерной форме, он может служить основой более широких обобщений.

В качестве примера можно назвать книгу [39], в которой проанализированы осуществленные в разных странах мира большепролетные конструкции покрытий. Получены закономерности распределения обобщенного технико-экономического показателя G , в котором учтены расходы стали и бетона, трудоемкость, энергоемкость и стоимость, приведенные к весу условного материала, для множества конструкций этого класса и их зависимость от площади перекрываемого помещения F (рис. 2).

Такой комплексный анализ дал несколько отличные результаты от анализа расхода стали, показанного на рис. 1.

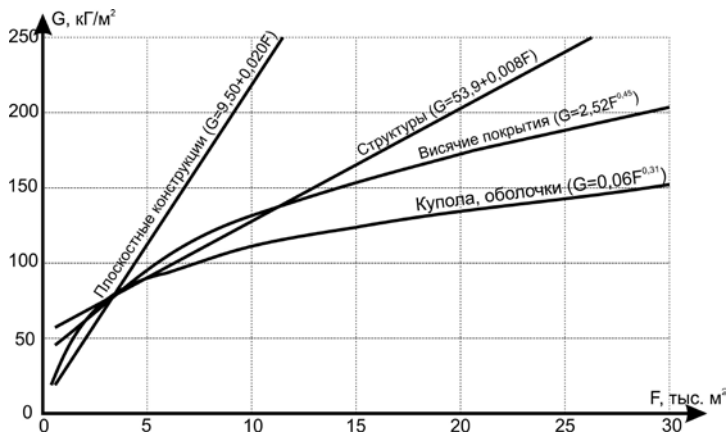


Рис. 2. Зависимость приведенного показателя веса перекрываемой площади

Аналогичные исследования проводились и для других конструкций, в качестве примера можно указать на работу [27], где анализировались конструкции пролетных строений мостов малого и среднего пролета. На рис. 3 в координатах «нагрузка-пролет» показаны области предпочтительного применения балочной, арочной и ферменной конструкций.

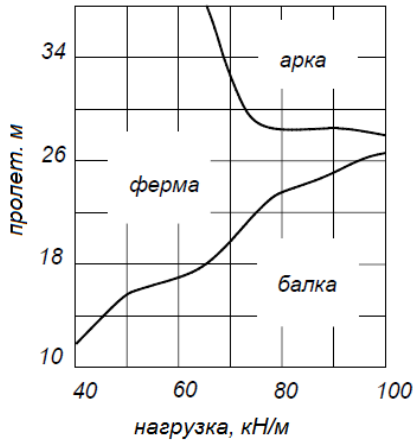


Рис. 3. Области рационального применения различных конструкций

Исследованию закономерностей изменения веса (равно как и других показателей качества) в зависимости от определяющих параметров противопоставляют суждение такого типа: *зачем использовать некие приближенные зависимости между весом и, например, пролетом, если в каждом конкретном случае оптимизирующая программа найдет наилучшее решение.*

Но при этом забывают, что именно общая теория дает возможность вырабатывать принципы и рекомендации, которые представляют собой качественные установки очень важные в начальной стадии проектирования, когда решается вопрос о принципиальных параметрах компоновочной схемы и выборе модели, подлежащей оптимизации. А инженерам давно известно, что правильный выбор общего компоновочного решения дает основной эффект, по сравнению с которым всякого рода уточнения деталей конструкции является второстепенной операцией. Выбрать арку или балку (башню или мачту, большой пролет или многоопорное решение и т.п.) важнее, чем определять параметры их конструкции.

Кроме того, следует напомнить, что лицо, принимающее решение, как правило, ищет компромисс между различными, часто противоречащими друг другу, показателями качества. И ему полезно знать присущие рассматриваемому типу конструкций закономерности, чтобы хотя бы знать, в какую сторону целесообразнее отступать от локального оптимума, соответствующего тому или иному частному критерию качества.

Пределные параметры

В известной книге [24] отмечается «... что уже столетия назад Галилею пришла мысль о том, что, поскольку вес конструкции растет, как куб ее размеров, а поперечное сечение несущих деталей увеличивается

пропорционально квадрату размеров, то напряжения в материале геометрически подобных конструкций должны расти пропорционально их размерам. Если разрушение конструкции происходит из-за растягивающих напряжений, прямо или косвенно определяемых ее собственным весом, то это означает, что с увеличением размеров относительная толщина и вес несущих деталей должны расти не пропорционально размерам и весу всей конструкции, а гораздо быстрее. Поэтому размеры таких конструкций не могут превышать некоторого предела».

Вообще, существуют задачи, для которых следует учитывать, что само конструктивное решение может влиять на условия нагружения. К простейшим из таких задач относятся такие задачи, в которых существенным является влияние собственного веса. Тогда распределение материала в конструкции меняет вид нагружения. К ним примыкают задачи, где нагрузка формируется набегающим потоком жидкости или газа, здесь выбор формы конструкции может влиять на распределение внешних воздействий и их интенсивность. Таким образом, следует выделить класс задач, где внешние силы, определяющие параметры конструктивного решения, в свою очередь зависят от этого конструктивного решения, т.е. имеет место обратная связь.

Как известно, в задачах с обратной связью могут наблюдаться эффекты, аналогичные потери устойчивости равновесия. Так, например, между задачей о влиянии собственного веса на теоретический объем стержня с заданными напряжениями и задачей устойчивости упругой системы существует формальная аналогия, которую нетрудно продемонстрировать на простейшем примере балки постоянного сечения [22].

Если A - площадь поперечного сечения, а $W = \rho A$ - его момент инерции (коэффициент ρ определяется формой поперечного сечения), то при заданной величине допускаемого напряжения σ можно записать условие

$$A = \frac{W}{\rho} = \frac{(q + \gamma A)L^2}{8\sigma\rho}; \quad A = \frac{q}{8\sigma\rho - \gamma L^2}. \quad (11)$$

Здесь q - нагрузка, действующая на балку, γ - объемный вес материала балки, L - ее пролет. Нетрудно видеть, что так как при $L = \sqrt{8\sigma\rho/\gamma}$ площадь поперечного сечения становится бесконечно большой, то по терминологии А.И. Виноградова происходит «потеря устойчивости веса».

В работе [58] показано, что для большинства конструкций коэффициент веса определяется формулой типа

$$\alpha_L = \frac{q\chi_q + g\chi_g}{\frac{R}{\gamma} - \chi_g L}, \quad (12)$$

где q и g полезная нагрузка и нагрузка от собственного веса соответственно, а χ_q и χ_g - их характеристики веса, вычисляемые по формуле (4). Материал конструкции характеризует константа $c = R/\gamma$ (отношение прочности к

удельному весу) условно равная максимально возможной длине нагруженного собственным весом подвешенного стержня. Максимальные размеры отдельных конструктивных элементов определяются обращением в нуль знаменателя в формуле (12).

Исследования предельных возможностей различных конструктивных решений выполнялись применительно к сооружениям различного назначения. Так, например, висячие и вантовые мосты основное свое применение находят в области гигантских (150...500 м) и сверхгигантских (более 500 м) пролетов, где они не имеют конкуренции со стороны мостов других систем и чаще всего являются единственно возможными конструкциями.

Практические и экономические возможности перекрытия пролетов висячими и вантовыми системами с металлическими балками жесткости и пилонами по сравнению с другими системами из металла можно проиллюстрировать данными следующей таблицы.

Предельные пролеты мостов различных систем

Система моста	Пролеты, м		
	$l_{\text{ПП}}$	$l_{\text{ЭП}}$	$l_{\text{Д}}$
Разрезная балка	150	100	–
Неразрезная балка	300	200	260
Разрезная ферма	500	250	230
Неразрезная ферма	700	400	375
Арочная	1700	1000	520
Балочно-консольная	1450	700	550
Вантовая	1500	700	1170
Висячая	3500	2000	2000

Примечание. $l_{\text{ПП}}$ – практически возможный предельный пролет;
 $l_{\text{ЭП}}$ – экономически целесообразный предельный пролет;
 $l_{\text{Д}}$ – достигнутые пролеты.

Принцип концентрации материала

Анализируя оптимальные размеры резервуаров, В.Г. Шухов [64] показал, что с ростом объема резервуара уменьшается расход металла на 1 м^3 объема резервуара. В соответствии с принципом увеличения единичной мощности объекта (концентрации материала) значительно выгоднее построить 1 резервуар объемом 100000 м^3 , чем десять резервуаров по 10000 м^3 . В качестве общего принципа идея концентрации материала, как способа уменьшения расхода стали, была достаточно четко сформулирована Н.С. Стрелецким, который в работе [56] установил теоретически, что концентрация материала снижает расход стали на 1 м^2 площади здания благодаря понижению конструктивного коэффициента.



В.Г. Шухов
(1863-1939)

Позже эту идею в числе основных принципов формообразования называл Н.П. Мельников [38], иллюстрируя ее убедительными примерами зданий мареновского цеха, конструкциями нефтяных резервуаров, доменных цехов.

Известные данные о зависимости расхода материала (стоимости) от единичной мощности X можно представить в форме

$$C_0 = a + bX, \quad (6)$$

и если перейти к удельным (на единицу мощности X) показателям, то получим соотношение

$$c = \frac{C_0}{X} = \frac{a}{X} + b, \quad (7)$$

в котором первое слагаемое соответствует коэффициенту веса α_L .

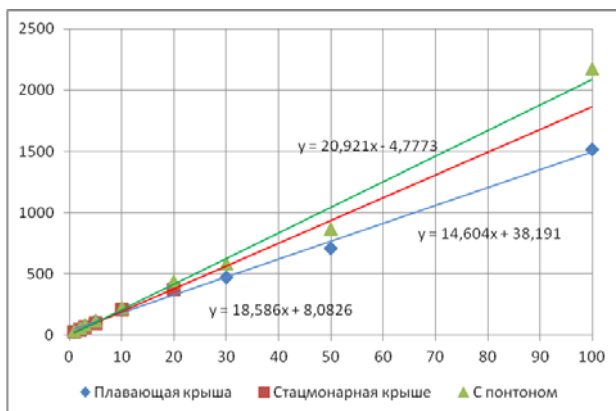


Рис. 4. Расход стали

На рис. 4 и 5 показаны справочные данные о расходе стали (кг) и удельном расходе стали (кг/м³) для резервуаров различного номинального объема и типа, иллюстрирующие зависимости (6) и (7).

В явной форме концепция роста единичной мощности была поставлена под сомнение, по-видимому впервые, академиком Б.Е. Патеном, который заметил, что рост единичной мощности машин, агрегатов, сооружений и установок чаще всего не сопровождается таким же ростом их надежности, и это может привести к масштабным потерям, как, например, во время Чернобыльской катастрофы.

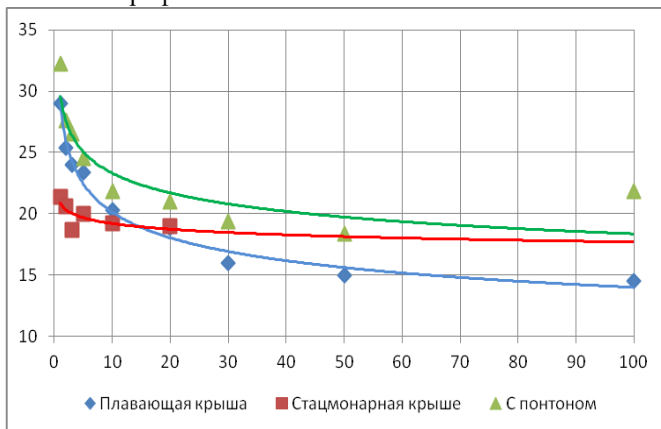


Рис. 5. Удельный расход стали на единицу объема

Более детальный анализ [44] показал, что если учитывать ограничения, которые определяются условиями безопасности, то рассматриваемая концепция имеет границу применимости X^* , что является принципиально важным.

Стоимость объекта с учетом возможных убытков от аварии, вероятность которой P будем пока полагать не зависящей от X , определяется выражением

$$C = C_0 + PU = a + bX + P\gamma X^k, \quad (8)$$

а удельная стоимость

$$c_e = a/X + b + P\gamma X^{k-1}, \quad (9)$$

где γ — некий коэффициент пропорциональности, с помощью которого увязываются показатели сметной стоимости объекта и ущерб от его аварии.

Удельная стоимость убывает пока X не превышает значения

$$X^* = \left[\frac{a}{P\gamma(k-1)} \right]^{1/k}. \quad (10)$$

При единичной мощности $X < X^*$ концепция увеличения единичной мощности себя оправдывает, однако увеличение мощности за граничную

величину X^* становится нерациональным из-за масштаба возможных угроз. При этом, чем выше надежность системы, тем дальше отодвигается граница рационального использования принципа увеличения единичной мощности. Но эта граница существенно приближается при увеличении ущерба от его аварии — показателя степени k из уравнения (8).

Аналогичная ситуация имеется и в принципе концентрации материала в основных элементах конструкции. Поскольку при аварийных воздействиях возможность отказа таких элементов такая же, как и у всех прочих, то с точки зрения обеспечения живучести принцип концентрации может оказать плохую услугу.

Не бойтесь делать то, что Вы не умеете делать. Помните, что ковчег построил любитель, а профессионалы построили корабль «Титаник».

Дейв Берри

Нетрадиционные способы анализа

Обычные расчеты мало что дают для оценки соответствия расчетной модели замыслу проектировщика, о правильной реализации ожидаемой игры сил в конструкции, о разумности полученных результатов расчета — т.е. о их валидации. Для этой цели должны использоваться специальные приемы, некоторые примеры которых представлены ниже.

Проблемы осмысления и понимания

Результаты статического и динамического расчетов сложной системы, представленные в числовой форме, содержат такие огромные массивы данных, что их осмысление и анализ практически невыполнимы. Мало помогает и предусмотренная в большинстве программных систем возможность выборочной печати результатов, поскольку расчетчик не всегда знает, какие из них окажутся критическими.

Существенно большая наглядность достигается при графическом отображении результатов в виде эюр, цветовых карт и изополей, при котором происходит серьезное сжатие информации, и она приобретает наглядность.

Но и это не всегда позволяет качественно произвести анализ, поскольку для системы в целом графическая информация может оказаться визуально недоступной, а при ее фрагментации восстанавливается наглядность, но возникает новая проблема — поиск того фрагмента, на котором реализовались интересующие пользователя значения тех или иных результатов расчета.

Общая картина, которую дает графическое представление результатов расчета, в наибольшей степени соответствует знаменитому тезису Хемминга, что **целью расчета является не число, а понимание**. Однако после анализа общей картины всегда требуется обратиться к численным результатам, которые могут уже сознательно быть выбраны из общего потока.

Использование упрощенных моделей

Одним из путей получения выводов такого рода является сопоставление результатов расчета, которые для контроля выполнялись не менее чем по двум сертифицированным, независимо разработанным и проверенным в практике программным комплексам [47]. Но методика сопоставления конкурирующих результатов [45] нацелена главным образом на выявление возможных ошибок моделирования, а не на выяснение особенностей работы конструкции.

Выводы о разумности результатов делаются чаще всего на основании сопоставления их с какими-то другими результатами. В частности, с теми, которым есть основания верить, или же с теми, которые легче анализируются и осмысливаются. Лучше, когда можно сопоставить результаты, имеющие некий интегральный формат, и лучше всего для этого подходит некоторая упрощенная модель сооружения, которую можно сопоставить с детальной схемой. На эту сторону проблемы указывал академик В.В. Новожилов, отмечая, что анализ результатов расчета по сложной модели напоминает обобщение и осмысление большого массива экспериментальных данных, а оценка явления в целом (с помощью простых расчетных моделей) позволяет с большим пониманием подойти как к построению, так и к анализу уточненной модели [40].

Упрощенная модель обеспечивает порой более понятную информацию, чем детальная и более точная модель. Создатель теории нечетких множеств Л. Заде подчеркивает [28]: *«По мере возрастания сложности системы наша способность формулировать точные, содержащие смысл утверждения о ее поведении уменьшается вплоть до некоторого порога, за которым точность и смысл становятся взаимоисключающими».*

Примером такой упрощенной модели является используемая в сейсмических расчетах «шашлычная» модель, в которой все вертикальные стержни располагаются вдоль одной оси, и сосредоточенные массы на уровне перекрытий размещались на той же оси. Более сложной является модель типа «коленчатый вал», в которой учитываются реальные координаты центров жесткостей и центров масс. Вертикальные стержни, моделирующие разные этажи, уже не располагаются на одной вертикальной оси, а сосредоточенные массы в общем случае сдвинуты в сторону и крепятся на невесомых бесконечно жестких горизонтальных консолях (рис. 6).

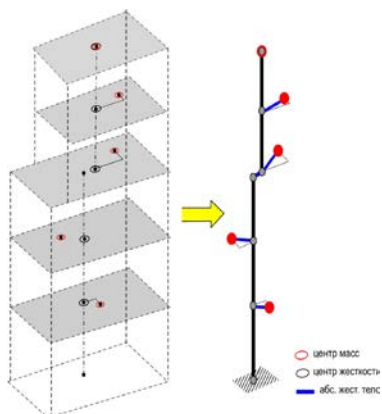


Рис. 6. Упрощенная модель

Оценка роли отдельных элементов

Важной особенностью анализа работы сооружения является выявление роли тех или иных конструктивных элементов. В частности, это понимание взаимодействия анализируемого элемента с соседними элементами и с системой в целом. Здесь можно использовать следующий прием — для анализируемого элемента задается температурное воздействие, и прослеживаются, какие усилия и перемещения при этом возникают в системе.

Заметим, что при этом косвенно проверяется и влияние возможного изменения жесткости рассматриваемого элемента. Ведь известно [51, с. 255], что для статически неопределимых ферм перераспределение усилий во всех элементах, вызванное изменением площади поперечного сечения i -го стержня, может быть достигнуто также изменением температуры этого стержня. Аналогичные выводы можно сделать и относительно изгибающих моментов в рамах, если только вместо равномерного нагрева стержня использовать неравномерный нагрев (перепад температуры по высоте сечения).

Естественно, что такого рода оценки чувствительности системы к изменению жесткости не являются абсолютными, а могут иметь только сопоставительный характер.

Пути передачи нагрузки

Классический способ оценки результатов расчета несущей конструкции основывается на анализе ее напряженно-деформированного состояния и сводится, в конце концов, к проверке выполнения некоторых наперед заданных ограничений, т.е. к серии локальных проверок работоспособности расчетных сечений. Такая проверка недостаточно информативна с точки зрения оценки эффективности работы системы «в целом» и анализа роли ее отдельных компонент.

В качестве одной из альтернатив может служить задача анализа путей для передачи определенной нагрузки, рекомендованная в качестве одной из форм проверки качества расчетов американскими атомными нормами [1]: *«Анализ пути восприятия нагрузки подразумевает представление таких результатов, которые позволили бы рецензенту проследить, где рождаются инерционные нагрузки и каким путем они передаются от мест приложения вниз на грунтовое основание. Хорошо подготовленный анализ пути восприятия нагрузки покажет, какие боковые силы воспринимаются каждой несущей конструкцией, позволит построить баланс сил на уровне каждого этажа и опуститься вниз до сдвига фундамента на грунте».*

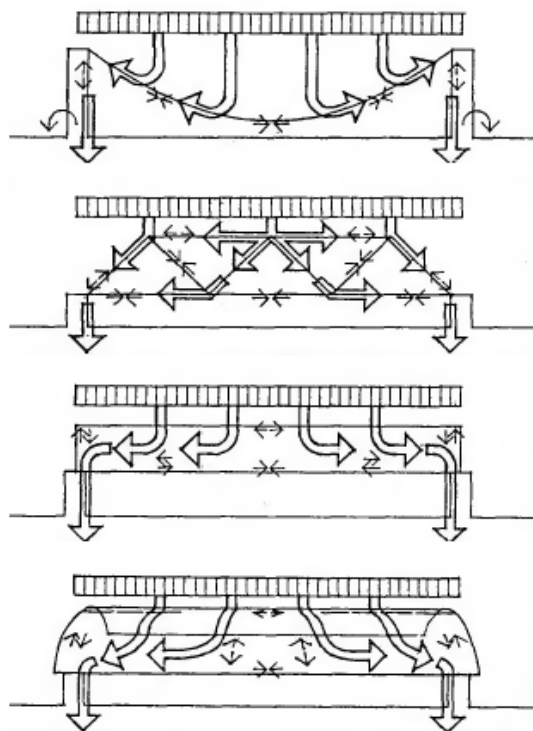


Рис. 7. Силовой поток в различных конструкциях

В этом отношении нельзя обойти вниманием уникальное справочное издание [60], в котором автор стремится представить несущие конструкции верхнего строения зданий и сооружений, рассматривая взаимодействие различных форм конструкций с нагрузкой и распределением внутренних усилий в них, что наглядно иллюстрирует рис. 7, заимствованный из этой книги.

Нетрудно решить в некотором смысле обратную задачу, а именно определить, с каких грузовых площадей в определенную точку опоры (на «землю») передается нагрузка. В основе такого анализа лежит теорема Бетти, поэтому, анализируя картину перемещений, вызванную единичным смещением связи на возможных грузовых площадках, можно судить о том, с каких площадок нагрузка в конце концов попадет на интересующую нас связь.

Например, на рис. 8 красным цветом показана зона нагружения, влияющая на вертикальную реакцию одной из колонн. Серым цветом отмечена область, где нагрузка создает реакцию противоположного знака.

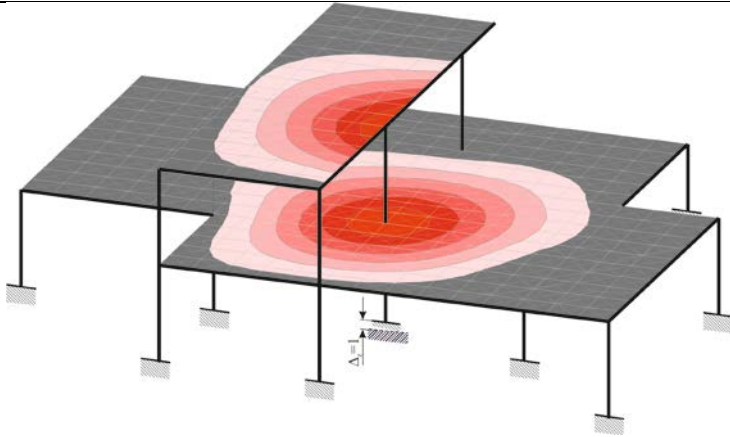


Рис. 8. Область влияния нагрузки на реакцию

Рассмотрение пути передачи нагрузки нашло применение в разработке теории весового анализа авиационных конструкций [30], где в качестве измерителя используется силовой фактор G , который определяет одновременно величину и протяжённость действия внутренних усилий в конструкции. Для ферм - это сумма произведений модулей внутренних усилий в стержнях на длины стержней

$$G = \sum_{i=1}^n |N_i| L_i \quad (7)$$

где i и n – номер и число элементов. Обобщение этого понятия на объёмные конструкции со сложным напряжённым состоянием приводят к следующему выражению для вычисления силового фактора

$$G = \int \sigma_i^{ecv} dV \approx \sum_{i=1}^n \sigma_i^{ecv} V_i \quad (8)$$

где σ_i^{ecv} – среднее эквивалентное напряжение в i -том элементе, V_i – объём элемента.

Равнопрочность, равноустойчивость, равнонадежность

Применительно к прочностному расчету инженерных конструкций решение проблемы поиска рациональной конструкции иногда приобретает вид принципа равнопрочности, равноустойчивости или равнонадежности компонент системы. Такой подход имеет глубокие исторические корни, он связан с представлением о полном использовании прочностных свойств материала, представляющимся, на первый взгляд, не только разумным, но и

единственно правильным, и такой подход к проблеме принятия инженерных решений прочно закрепился в виде традиции.

Равнопрочная и полностью напряженная конструкция интуитивно привлекательна, поскольку каждый элемент «отдает все свои силы» для поддержки нагрузок. Поэтому поиск таких конструкций активно продолжался. Нетрудно видеть, что равнопрочность элементов конструкции молчаливо предполагают их одинаковую роль в обеспечении безотказности системы в целом, когда отказ хотя бы одного элемента является критическим событием. Такие системы называются системами с последовательными (в смысле безотказности) соединениями составляющих их элементов, к ним относятся, например, все многоэлементные статически определимые конструкции. Удалось доказать, что статически определимые равнопрочные конструкции (стержневые системы, мембраны, безмоментные оболочки) являются оптимальными по расходу материала, для систем статически неопределимых вопрос является спорным. Имеются примеры, когда оптимальными были равнопрочные конструкции, но в общем случае это не так.

Заметим, что метод оценки несущей способности конструкции, который закреплен в нормах проектирования, основан на схеме поиска слабейшего звена конструкции, поиск которого реализован путем последовательных проверок всех расчетных сечений. С этой точки зрения система рассматривается как последовательно соединенная цепь расчетных сечений, что соответствует реальности далеко не во всех случаях. И стремление проектировщика обеспечить равенство действующих усилий несущей способности для всех расчетных сечений есть, по сути, стремление к построению равнопрочной конструкции.

Конструктивные элементы, образующие структуру несущей системы, находятся в сложном функциональном взаимодействии в процессе эксплуатации объекта. Они выполняют разную функцию, отличаются вариацией нагруженности и отличаются скоростью износа. И если в режиме нормальной эксплуатации различия между этими показателями у различных элементов системы относительно невелики, то этот вывод резко меняется при рассмотрении возможных экстремальных ситуаций.

Дело в том, что элементы здания, имеющие большие запасы прочности или легкие режимы работы, могут рассматриваться в определенном смысле как резервные, они могут оказаться необходимыми для предотвращения общего обрушения в случае аварийных ситуаций, не предусмотренных проектом напрямую. На этом строится стратегия защиты здания от непропорционального разрушения по методу альтернативного пути и заметно улучшается живучесть системы. С другой стороны, возможна и обратная постановка задачи, когда сознательное снижение прочности некоторых элементов системы, берущих на себя функции защиты и своим разрушением предотвращающие перегрузку других элементов, позволяет влиять на предполагаемую картину разрушения и добиваться за счет этого

локализации возможных неприятностей.

Таким образом, вполне логично представить себе сознательное нарушение принципа равнопрочности применительно к элементам (блокам, подсистемам) играющих различные роли в обеспечении общей надежности сооружения. Но если соответствующая подсистема конструктивно составлена из нескольких одинаково важных частей, то безусловно логично применение принципа равнопрочности к обеспечению работоспособности их соединения (болтовому или сварному стыку, например). Создание стыков на основе их равнопрочности с деталями, которые они соединяют, стало общепринятым приемом конструирования.

Идея **равноустойчивости** была выдвинута Ф. Блейхом в 1924 году. В соответствии с этой идеей критические по Эйлеру напряжения центрально-сжатого стержня приравнивались критическому напряжению идеальной упругой пластинки, входящей в состав поперечного сечения данного стержня. Из этого условия было найдено простое соотношение между гибкостью стержня и отдельно пластинки. Долгое время это соотношение считалось рекомендуемым и даже вошло в некоторые нормативные документы по проектированию стальных конструкций.

В отличие от прочностных проверок, где вопрос о перегрузке или недогрузке решается простым сопоставлением напряжений, оценка роли того или иного элемента в обеспечении общей устойчивости совсем нетривиальна. Но главное состоит в том, что сопоставлять надлежит не роли отдельных элементов, а различные формы потери устойчивости, и лишь в немногих случаях эти формы четко связаны с локальной неустойчивостью определенных элементов системы.

Для конструкций оребренных пластин и оболочек характерно наличие множества форм потери устойчивости (общих, местных). Зависимости критических нагрузок общих и местных форм от параметров конструкции, как правило, носят противоположный характер. Например, увеличение параметра тонкостенности (отношение некоторого габаритного размера поперечного сечения к толщине) приводит к повышению критической нагрузки для общих форм и понижению для местных.

На основании этих соображений предлагалось проектировать эти конструкции такими, чтобы критические напряжения для этих форм были равны. Впоследствии выяснилось, что конструкции, запроектированные по принципу равноустойчивости, показали особую склонность к дестабилизирующему эффекту начальных несовершенств. Опасность такого «наивного» подхода к проблеме оптимизации, основанного на условии равноустойчивости, подчёркивалась уже в обзоре [5], где указывалось, что для пространственной системы, в которой выполняется принцип равноустойчивости, возможно разрушение конструкций, носящее лавинообразный характер.

Именно эта особенность поведения дала повод Дж. Томсону назвать равноустойчивость наивным принципом оптимизации. Он отмечает, что

симметрия и отвечающая оптимизации равноустойчивость являются в некотором смысле явлениями патологическими и в топологическом смысле структурно неустойчивыми. Они не наблюдаются в природе, отмечает Томсон, и попытки человека нарушить это правило встречает со стороны природы сопротивление в виде нарушающих симметрию несовершенств [12].

Для систем с последовательным в смысле надежности соединением элементов (напомним, что нормы проектирования считают таковыми любые конструкции) общая надежность определяется наименее надежным слабым звеном. Если увеличить его надежность по каким-то причинам невозможно, то и для всех других элементов требовать повышенную надежность не имеет смысла. Это свойство последовательных систем лежит в основе **принципа равнонадежности**.

Совершенно логичным является формулировка одинаковых требований по надежности функционирования (целевых уровней надежности) к объектам примерно одинаковой степени ответственности, независимо от материала (сталь, железобетон или др.), из которого они будут запроектированы, и от вида конструктивной схемы. Также обстоит дело с требованиями равновероятности появления расчетных нагрузок, независимо от их количества в расчетном сочетании. На этих позициях стоит вся система нормирования.

Относительно недавно целевые уровни надежности стали дифференцировать для объектов различного класса ответственности, принимая во внимание последствия отказа, включая человеческие жертвы, экономический ущерб, экологические потери, связанные с ущербом для окружающей среды, потери культурно-исторических ценностей (Еврокод предусматривает три класса — СС1, СС2 и СС3).

Сегодня практически повсеместно предпочтительным является установление целевых значений мер надежности на уровне конструктивного элемента при проверках соответствующих предельных состояний. Это объясняется тем, что проектировщик в традиционных расчетах применяет формат безопасности на уровне элементов, а точнее сечений. И несмотря на то, что конструктивные элементы подразделяются с точки зрения последствий отказов на классы надежности (RC), последние практически соответствуют классам СС по последствиям системы отказа.

Потенциальная энергия деформаций как инструмент анализа

Хотя обоснование основных законов строительной механики, ее вариационных принципов связано с рассмотрением потенциальной энергии деформаций, сама по себе энергия деформаций как рабочий инструмент исследования при решении прочностных задач обычно не использовалась.

Но одним из сложных вопросов, связанных с анализом работы несущих конструкций, является проблема удобного отображения результатов такого

анализа. Напряжения и деформации являются многокомпонентными объектами и их анализ требует одновременного рассмотрения нескольких компонент. Поэтому оказалось полезным такое универсальное средство отображения особенностей напряженно-деформированного состояния системы, как картина распределения потенциальной энергии деформаций U . Преимущество здесь состоит в том, что каждому элементу системы, напряженное состояние которого обычно представлено целым набором внутренних усилий или напряжений, ставится в соответствие только одна величина (энергия его деформации), которая может служить интегральной мерой нагруженности системы.

Интуитивно ясно, что чем меньше величина U , тем лучше система сопротивляется внешним воздействиям. В частности, это соображение лежит в основе утверждения В.Г. Шухова, что прочность материала используется лучшим образом, если он работает на растяжение-сжатие, и наихудшем — при изгибе. В качестве иллюстрации этого тезиса в работе [17] приводится сопоставление двух вариантов работы конструкции, представленной одним и тем же стержнем (рис. 9). При сжатии напряжение $\sigma_1 = P/(bh)$, а при изгибе $\sigma_2 = 12P/(bh)$, т.е. сжатый стержень может нести двенадцатикратную нагрузку. Соотношение энергии деформаций, значения которой соответственно равны $U_1 = P^2 l / (2Ebh) = 4P^2 / (Eb)$ при сжатии и $U_1 = 64P^2 / (Eb)$ при изгибе.

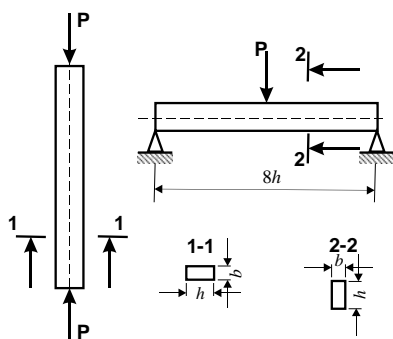


Рис 9. К сопоставительному расчету

Для проведения углубленного анализа при проектировании конструкции в работах [37, 15, 23, 63] предлагается введение такого критерия эффективности, как коэффициента использования материала. Он характеризует степень использования материала в силовых системах и определяется из сопоставления энергии формоизменения U_f с предельным его значением $U_{f,\text{lim}}$ (энергоемкостью) [15] как отношение

$$\eta = U_f / U_{f,\text{lim}} \cdot \quad (1)$$

Здесь

$$U_f = \frac{1+\mu}{6E} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + \frac{1}{2G} (\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2),$$
$$U_{f,\text{lim}} = \frac{(1+\mu)R_{\text{lim}}^2}{3E},$$

а через R_{lim} обозначено предельное напряжение материала, которое может устанавливаться из опыта на разрушение при одноосном напряженном состоянии (например, в испытаниях на разрыв).

Для допустимых конструкций под действием расчетных комбинаций внешней нагрузки энергетический критерий изменяется в границах $0 \leq \eta \leq 1$, то есть величина η есть безразмерной и является аналогом коэффициенту полезного действия. Поэтому в силовых конструкциях величину η можно трактовать как критерий эффективного использования материала. Чем больше величина η , тем соответствующий проект конструкции с точки зрения растраты материала есть рациональным и наоборот.

Распределение потенциальной энергии деформаций по объему несущей конструкции иллюстрирует энергетическую «загрузку», характеризующую, в определенном смысле, роль элементов расчетной схемы при сопротивлении системы рассматриваемому нагружению.

Наличие в составе конструкции относительно локальных частей, отвечающих за целостность и надежное функционирование объекта в целом, делает систему очень уязвимой по отношению к возможным отказам упомянутых частей («узкое горлышко»). Возможно, следует не допускать элементы или фрагменты конструкции, накапливающие более некоторого процента потенциальной энергии деформации всей конструкции, т. е. стремиться к достаточно равномерному распределению плотности потенциальной энергии по конструкции (изоэнергетичности).

В некоторых работах изоэнергетичность, т. е. условие постоянства критерия η , полагается условием, необходимым для отыскания рациональной конструкции [17, 62, 49].

Да, человек смертен, но это было бы еще полбеды. Плохо то, что он иногда внезапно смертен, вот в чем фокус!

М.А.Булгаков "Мастер и Маргарита"

Проблема неустанавливаемых воздействий

Общепринятый метод проектирования молчаливо предполагает, что при проектировании рассмотрены и приняты во внимание все нагрузки и воздействия, которые могут встретиться на протяжении жизненного цикла проектируемого объекта. Но помимо четко предсказуемых нагрузок и воздействий, всегда существует возможность реализации некоторого не предусмотренного ни нормативными документами, ни прогнозом проектировщика случайного воздействия на объект проектирования.

Эти воздействия, безусловно, не являются массовыми и поэтому затруднен их статистический анализ, а также учет их влияния в вероятностном анализе надежности. Американский экономист Nicolas Nassim Taleb назвал подобные события «черными лебедями».²

Исследование реакции сооружения на возможные катастрофические воздействия и проверка его живучести стало в настоящее время практически обязательным элементом проектирования. При этом под сомнением оказались некоторые из основных положений традиционного подхода к анализу, в частности ориентация на использование статистических свойств нагрузок и материалов.

Катастрофические события, которые влекут за собой тяжёлые последствия, крайне редки и для них отсутствует достаточный объем статистических данных. Общеизвестно, что одна из главных причин аварийных отказов в строительстве — это ошибки проектирования, дефекты изготовления и монтажа; низкое качество материалов и конструкций;

² Ювенал говорил: "rara avis in terris nigroque simillima cygno"(лат.) – «хороший человек так же редок, как чёрный лебедь», поскольку существовала гипотеза о том, что все лебеди белые. Это было верно, пока в 1700 г. не был обнаружен черный австралийский лебедь...

неправильная эксплуатация. Разрушения от террористических нападений оказываются гораздо (на несколько порядков) реже этих причин.

Невозможность обоснованного прогнозирования приводит к необходимости учитывать возможность реализации каких-то условных, в некотором смысле наиболее неблагоприятных, воздействий, или же постулировать возможные локальные повреждения и анализировать реакцию системы на такие события.

Максимизация энергии воздействия

Предполагается, что возмущение может быть достаточно сильным, чтобы было необходимо считаться с его последствиями, а природа их такова, что предсказать момент и место появления, а также другие количественные характеристики не представляется возможным. Воздействия такого типа в Еврокоде [4] относятся к категории неустановленных (unidentified actions). Но все равно для них должны выполняться уравнения метода перемещений

$$\mathbf{Kz} = \mathbf{P}, \quad (9)$$

где \mathbf{K} – матрица жесткости системы, \mathbf{z} – вектор узловых перемещений, \mathbf{P} – вектор нагрузок, приведенных к узловым силам. При этом направления векторов внешних узловых нагрузок \mathbf{P} и вектор перемещений \mathbf{z} в общем случае различны и имеют разные углы относительно исходных осей.

Учет всех мыслимых вариантов формы возможного аварийного нагружения практически невозможен, поэтому, исходя из консервативного подхода, логично тестировать конструкцию на наиболее неблагоприятную форму воздействия.

С энергетической точки зрения наиболее осторожным решением было бы такое, что направления векторов \mathbf{z} и \mathbf{P} совпадают, и тогда работа внешних сил на вызываемых этими силами перемещениях будет максимально возможной.

Это условие можно записать как

$$\mathbf{Kz} = \mathbf{Lz}, \quad (10)$$

где компоненты диагональной матрицы \mathbf{L} играют роль обобщенных жесткостей системы, когда воздействия на систему осуществляются в направлении степеней свободы, в соответствии с вектором \mathbf{z} .

Мы пришли к задаче на собственные значения, решение которой определяет диагональную матрицу собственных значений $\mathbf{\Lambda}$ и матрицу $\mathbf{\Phi}$, столбцами которой являются собственные векторы, что записывается как

$$(\mathbf{K} - \mathbf{\Lambda})\mathbf{\Phi} = \mathbf{0}. \quad (11)$$

Отсюда легко установить, что воздействие на систему, максимальное по работе внешних сил, соответствует распределению узловых нагрузок, повторяющем форму первого собственного вектора матрицы жесткости.

Оценка живучести

Живучесть конструкции состоит в том, чтобы повреждение одного элемента не распространялось лавинообразно на другие элементы и не приводило к обрушению всей системы или ее значительной части. Проверка этого была положена в основу методики анализа живучести, базирующейся на проверках несущей способности системы при удалении из нее того или иного элемента.

Естественно предположить, что разные элементы по-разному влияют на поведение системы с точки зрения ее живучести. Возможность количественного описания степени воздействия отказа того или иного элемента на поведение системы имеет особое значение при проведении анализа систем. Такое ранжирование позволяет указать места повышенного внимания к качеству работ и обосновать соответствующие контрольные процедуры. А для проектирования защиты от аварийных воздействий ранжирование помогает построить стратегию такой защиты.

Живучесть стержневой системы непосредственно связана со статической неопределимостью, и степень статической неопределимости иногда полагают мерой живучести. Несмотря на то, что степень статической неопределимости интуитивно кажется идеальным показателем эффективности безопасности системы, эта метрика обеспечивает только необходимое, но не достаточное условие живучести. Высокая степень статической неопределимости не означает более живучую структуру (достаточно вспомнить об абсолютно необходимых элементах структуры, удаление которых ведет к геометрической изменчивости).

Предлагались различные измерители живучести [6, 7, 11], основанные на сопоставлении свойств исходной и поврежденной системы, практически все они привязывались к определенному варианту нагружения. Более универсальным была предложенная Де Бьяджи [2, 3] мера живучести, связанная со «сложностью» системы, которая является мерой различных путей нагрузки структурной системы при произвольной схеме нагружения, и оценивается числом фундаментальных подсистем (геометрически неизменяемых основных систем метода сил), которые можно получить для заданной структуры.

В работе [43] было предложено использовать для оценки живучести матрицу-проектор \mathbf{R} [48], компоненты которой характеризуют статико-кинематические свойства структуры. Компоненты ρ_{ii} главной диагонали матрицы \mathbf{R} показывают важность отдельных элементов, а побочные члены оценивают взаимодействие этих элементов друг с другом. Сумма диагональных членов матрицы \mathbf{R} равна степени статической неопределимости, и можно считать, что компонент ρ_{ii} указывает на степень участия i -го элемента в формировании статической неопределимости системы. Вообще говоря, чем меньше значение компонента ρ_{ii} , тем важнее присутствие соответствующего элемента с точки зрения обеспечения

неизменяемости. Если значение равно 0, то соответствующий элемент является безусловно необходимым. Напротив, если его значение равно единице, то соответствующий элемент не влияет на поведение прочих элементов и его удаление из системы, уменьшая на единицу степень статической неопределенности, никак не сказывается на неизменяемости.

В отличие от оценки сложности [2, 3], которая связана с последовательным анализом возможных путей передачи нагрузки через все допустимые основные системы метода сил, матрица-проектор, относящаяся ко всем возможным основным системам одновременно, дает такую оценку сразу.

Возможность количественного описания степени воздействия отказа того или иного элемента на поведение системы имеет особое значение при проведении анализа систем. И поскольку отказ элемента не обязательно связан с аварийным воздействием, а может быть следствием ошибки или грубого брака в работе, то такое ранжирование позволяет указать места повышенного внимания к качеству работ и обосновать соответствующие контрольные процедуры. А для проектирования защиты от аварийных воздействий ранжирование помогает построить стратегию такой защиты.

Ранжирование по признаку влияния на обрушение системы не привязано к ее функциональному назначению, поскольку в обычных ситуациях понятие живучести описывается как абстрактное стремление к сохранению целостности объекта. Но определение живучести как способность сооружения выполнять свои основные функции, несмотря на полученные повреждения, пожалуй, более целесообразно. Ибо во многих случаях утрата возможности функционирования может быть не связана с распространением разрушения, о чем свидетельствуют соответствующие примеры.

Так, для многопролетного мостового перехода полная потеря функциональности может наступить при аварии только одного пролета, а линия электропередачи перестает функционировать при таком локальном разрушении, как обрыв провода. В обоих случаях речь шла о системах, функционирование которых зависит от их связности. То же может относиться к необходимости сохранения сплошности – так следует оценивать возможность работы резервуара, когда полная неработоспособность может наступить при появлении отверстия в стенке или днище.

Убытки от потери функциональности, возникающие при локальных отказах, могут заметно меняться в зависимости от возможностей восстановления, оценки времени его реализации, которое во многом определяет величину этих убытков (недопоставленная электроэнергия, дополнительные транспортные затраты в связи с необходимостью объездов и т.п.). Здесь возникает совершенно другая шкала важности тех или иных элементов или подсистем конструктивного комплекса, связанная с их ремонтпригодностью.

С другой стороны, в системах, функционирование которых не связано жестко с сохранением связности, появляется возможность

повышения их живучести за счет удачного секционирования, которое мешает распространению аварийных отказов. Такая система защиты от лавинообразного обрушения хорошо известна в конструкциях линий электропередачи, где секционирование достигается путем включения в линию анкерных опор. Другая система секционирования основана на прерывании непрерывности конструктивного решения, обе они используются как способ противопожарной защиты (брандмауэр и противопожарный разрыв).

Оценка уязвимости

С точки зрения возможных сюрпризных событий важной характеристикой объекта проектирования является его уязвимость.

Уязвимость характеризует возможность нанесения рассматриваемой системе повреждений любой природы теми или иными внешними средствами или факторами. Уязвимость неразрывно связана с известной характеристикой «живучесть» и с дополнительной характеристикой «мобилизованность», недавно предложенной в [10]. Живучесть является в некотором смысле пространственной характеристикой, показывающей в том числе, как локальное возмущение распространяется по пространству системы и может ли это локальное разрушение получить непропорционально большое развитие «вширь».

А мобилизованность показывает, насколько система готова и способна среагировать на локальное во времени (импульсное) неожиданное возмущение. В обоих случаях возмущение может быть достаточно сильным, чтобы было необходимо считаться с его последствиями, а природа его такова, что предсказать момент и место появления, а также другие количественные характеристики не представляется возможным. Заметное отсутствие мобилизованности конструкции, как и недостаточная живучесть, должны служить поводом к повышенному вниманию и использованию некоторых защитных мероприятий.

Из малой вероятности реализации возможного возмущения следует, что проверке подлежит поведение конструкции, на которую действуют только постоянные нагрузки и некоторая наиболее вероятная часть временных нагрузок (например, их средние значения), и оценивать уровень мобилизованности конструкции именно в таком состоянии.

Для наглядности можно сопоставить поведение двух сооружений – это дымовая труба, для которой расчетная ветровая нагрузка реализуется очень редко, а все остальное время ее загруженность очень мала, и резервуар, загруженность которого относительно велика почти в любой момент времени. Естественно, что мобилизованность трубы значительно превышает мобилизованность резервуара, хотя с точки зрения норм проектирования их надежность обеспечена в равной мере.

Примеры учат не меньше, чем правила, а ошибки — больше, чем правильные, но непонятные доказательства.

Арнольд В.И.

Проблемы обучения

Дальнейшее изложение посвящено критическому анализу современного состояния университетской подготовки инженеров, специализирующихся в области проектирования строительных конструкций. Базовой дисциплиной для них является теория сооружений, понимаемая в широком смысле этого слова. В основе лежит анализ тех вопросов, которые задают авторам программной системы СКАД рядовые пользователи. Этот анализ демонстрирует низкий уровень общетеоретической подготовки и слабую связь отдельных дисциплин, составляющих систему инженерного образования.

Дифференцирование уровней подготовки

Инженерная деятельность тесно связана с оценкой прочности и устойчивости, которая основывается на дисциплинах прочностного цикла (сопротивление материалов, строительная механика, теория упругости и т.п.). Тем не менее, большинство инженеров использует только малую долю знаний, полученных из соответствующих университетских курсов. И дело здесь состоит не в том, чтобы «дать больше строительной механики», сколько в том, чтобы точнее представлять возможности её применения. Здесь основной является абсолютно ясная картина разнообразия работы инженеров даже в рамках проектной деятельности.

Существует широко распространенное заблуждение, что курс строительной механики (точнее вся цепочка прочностных дисциплин) и представляют собой теорию сооружений. К сожалению это не так.

Одной из болезненных проблем этого курса является то, что он читается до курса конструкций (отсюда некоторая схоластичность). Все рассматриваемые расчетные схемы оказываются мало привязанными к конструктивным решениям, которые они должны отображать, более того, проблема обоснования расчетных схем вообще не затрагивается. Если же ввести надстроечный курс теории сооружений, то многие вопросы такого рода исчезнут.

Кроме того, программа подготовки в этой цепочке дисциплин является

«универсальной»), в то время как практика требует специалистов с различным уровнем подготовки по строительной механике. Это своеобразная пирамида — чем выше уровень подготовки, тем меньшее число таких специалистов необходимо. Очевидно, что и содержание обучения специалистов разного уровня должно быть различным. Можно указать на три уровня подготовки и соответствующего им набора знаний и навыков.

1. Наибольшая потребность существует в специалистах-инженерах, которые могут оценивать прочность отдельных элементов сооружения, используя готовые результаты расчетов. Инженеры этого уровня опираются на справочники, нормативные материалы или вычислительные средства по расчету сооружений и могут не владеть в совершенстве методами нахождения внутренних усилий, но знать, где и как их получить и как их интерпретировать.

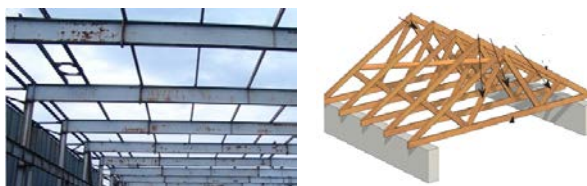


Рис. 10. Объекты 1-го уровня

2. Практика требует также инженеров более высокого уровня, которые умеют не только применять готовые результаты, но и владеют методами их получения и привязки к специфике эксплуатации сооружений. Такие инженеры должны уметь образовывать расчетные схемы конструкций, выявлять их особенности, влияющие на расчет и его результаты, и владеть способами целенаправленного изменения усилий.



Рис. 11. Объекты 2-го уровня

3. В меньшем объеме, но не менее остра потребность в специалистах, умеющих ставить и решать сложные инженерные задачи, больше относящиеся к научным вопросам. Это такие задачи, как регулирование и оптимизация, разработка методов расчета нестандартных конструктивных схем сооружений, оценка динамического поведения и т.п.



Рис. 12. Объекты 3-го уровня

Указанным уровням подготовки соответствуют различные способы преподавания и приобретения знаний:

Первый, наиболее простой уровень — получение информации добавляющей новые факты, но не выходящей за рамки известных понятий.

Второй, более высокий уровень предполагает получение принципиально новых знаний о принципах и методах решения целого класса задач и знакомство с их теоретическими основами.

Высший, третий уровень направлен на приобретение навыков конструкторской деятельности на основе синтеза различных знаний и умение критического оценивания предлагаемой конструктивной формы.

Компьютеризация образования

В специальной работе Гарвардского университета (The Programme of Information Resources Policy. Harvard University. Centre for Information Policy Research. Cambridge, 1989) специально отмечается:

Вопрос «Как использовать компьютер для обучения студентов?» глубоко ошибочен, а правильная формулировка должна быть такой «Как учить студентов в век компьютеров?» Когда машина делает что-то за студента, он этому не учится. Эта парадигма определяет ограничения на использование промышленных программ в процессе обучения.

Промышленные программы создаются для инженеров, они быстро и точно выполняют за него некоторую часть расчетной работы, но для их правильного применения инженер должен знать и понимать методику, положенную в основу программной разработки.

Но студент не может освоить методику, используя программу, представляющую для него «черный ящик», который работает загадочным для обучающегося способом. В результате можно получить скорее вред, чем пользу.

Отсюда следует вывод, что обучающие программы должны быть построены на других принципах. В частности, может быть использован принцип максимальной прозрачности «черного ящика» с работой в пошаговом режиме (очередной шаг должен выбрать обучаемый, возможно из предложенного ему меню) и с возможным доступом к промежуточным

результатам. Студент должен оценить каждый промежуточный результат и выбрать дальнейший план действий, включая возможность возврата на несколько шагов назад и изменения параметров расчета. Таким способом обучающая программа активизирует роль студента, превращая его в лицо, получающее и оценивающее информацию и принимающее решения.

Означает ли это, что промышленные программы вообще не должны использоваться в обучении? Конечно, нет. Мне видится по крайней мере два способа их использования. Первый способ, это использование такой программы в штатном режиме, когда уже после изучения и усвоения соответствующего курса (например, строительной механики) студент использует программу при выполнении курсовых или дипломного проекта и экономит время на рутинных частях работы.

Более интересен на мой взгляд второй способ, когда используя возможности программы, студент выполняет серию параметрических расчетов, исследуя влияние того или иного параметра конструкции на поведение конструкции (показатели прочности, устойчивости и т.п.). В таком режиме, в частности, могут использоваться программные продукты, входящие в пакет SCAD Office, где наиболее распространенные конструктивные элементы стальных и железобетонных конструкций могут анализироваться в режиме немедленного ответа

Существует несколько вариантов использования промышленных программных продуктов в процессе обучения специалиста. В частности, рассматриваются такие способы, как:

- Студент, уже после изучения и усвоения соответствующего курса (например, строительной механики), использует программу при выполнении курсовых или дипломного проектов, экономя время на рутинных частях работы.
- Преподаватель демонстрирует и анализирует особенности напряженного состояния объектов, когда такой анализ направлен на понимание общей работы сооружения.
- Студент использует компьютерную программу в качестве тренажера, помогающего приобрести навык принятия решений. Здесь, используя возможности программы, студент выполняет серию параметрических расчетов, исследуя влияние того или иного параметра конструкции на поведение конструкции (показатели прочности, устойчивости и т.п.). В таком режиме, в частности, могут использоваться программные продукты, входящие в пакет SCAD Office, где наиболее распространенные конструктивные элементы стальных и железобетонных конструкций могут анализироваться в режиме немедленного ответа

Последнее представляется одним из важнейших элементов компьютеризации высшего образования — именно практика использования тренажеров позволяет решить проблему, которая звучит так: «Никто не учится на чужих ошибках, опыт приобретается только после того, как

обучаемый сделал сам и проанализировал свои ошибки». И тренажер позволяет сделать этот процесс безопасным.

Демонстрация поведения

Цель расчета двояка: с одной стороны расчеты выполняются для того, чтобы проверить безопасность и удобство эксплуатации конструктивного решения, а с другой стороны – чтобы понять, как работает сооружение под нагрузкой. Традиционно обучение сосредотачивает основное внимание на первой из них, хотя вторая цель заслуживает не меньшего внимания, и здесь рассмотрение результатов компьютерного анализа может стать удобным педагогическим приемом.

Многие недоразумения в оценке поведения пространственных конструкций связаны с «плоским мышлением», воспитанным стандартными курсами строительной механики. Студент (а иногда инженер) ищет соответствующие аналогии и начинает рассматривать оболочку как систему пересекающихся арок, а плиту как аналог балочного ростверка (ошибка Софи Жермен). Последняя ошибка даже попала в нормы проектирования железобетонных конструкций. В последней редакции строительных правил России сказано, что можно не учитывать влияние крутящих моментов в плите (!).

Эти заблуждения легко опровергаются демонстрацией результатов расчета. Скорость их выполнения позволяет преподавателю демонстрировать главные особенности работы.

В качестве примера можно указать на демонстрацию работы безраспорной оболочки двоякой кривизны (на рис. 13 указаны связи, наложенные на ее опорные узлы).

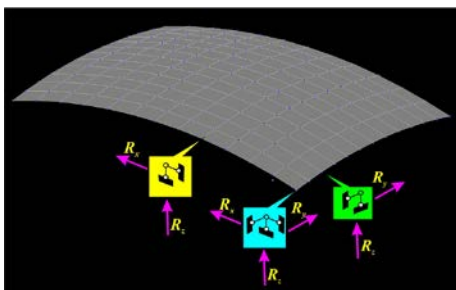


Рис. 13. Граничные условия

При анализе работы такой оболочки возникает вопрос: почему для арки требуется создавать некоторые устройства, воспринимающие распор, а для оболочки без них можно обойтись? Ответ на этот вопрос дает множество поводов поразмышлять об особенностях работы этих объектов:

Арку, описанную по любой кривой, можно «выпрямить» без изменений ее длины, и препятствовать этому могут либо устройства, обеспечивающие

неподвижность концов (упоры, затяжка), либо изгибная жесткость арки, но тогда она работает как кривой брус. А оболочку, описанную по поверхности ненулевой гауссовой кривизны, нельзя «распрямить» и положить на плоскость без удлинений и разрывов. Она сопротивляется в силу своей формы (рис. 14).

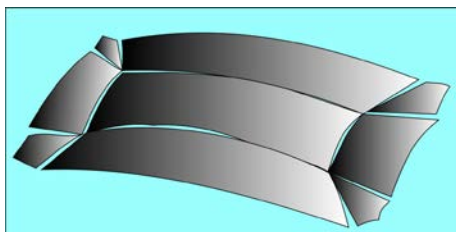


Рис. 14. Попытка уложить конструкцию на плоскость

Если такое объяснение еще сопровождается демонстрацией распределения потоков главных напряжений (рис. 15), то студент получит, как минимум, введение в проблему расчета тонкостенных пространственных систем.

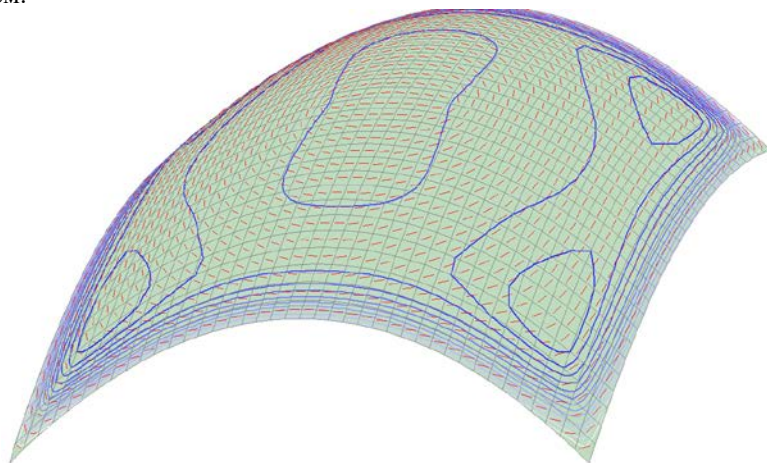


Рис. 15. Главные напряжения (мембранная группа усилий)

Поучительным может быть пример изгиба плиты при нестандартном нагружении. Это в некотором смысле обратная задача — плоская конструкция искривляется, и при этом кроме изгиба появляется кручение.

Итак, прямоугольная плита оперта в четырех углах, а воздействием является смещение одной из опор (рис. 16). Расчет покажет, что отсутствуют изгибающие моменты относительно осей, параллельных сторонам плиты ($M_x=0$ и $M_y=0$).

То, что плита искривляется и изгибающие моменты в ней имеются, можно увидеть, если рассматривать направления главных площадок, которые повернуты на 45° по отношению к упомянутым осям.

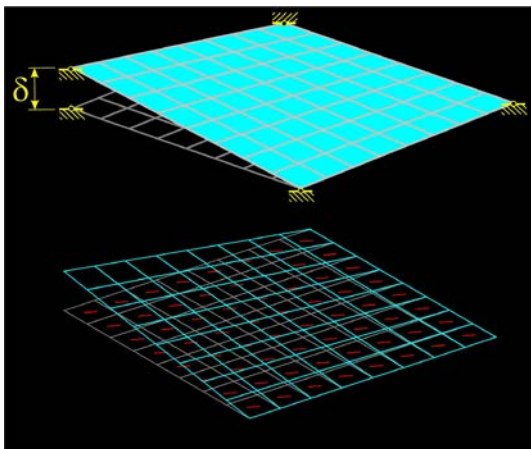


Рис. 16. Изгиб плиты

При решении вопроса о демонстрации поведения конструкции под нагрузкой важно понять, какие параметры поведения являются наиболее информативными и отражающими общий характер работы конструкции.

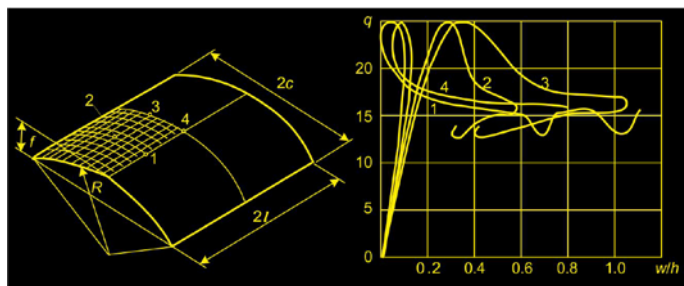


Рис. 17. Зависимость перемещений характерных точек от интенсивности нагружения

Так, одним из наиболее распространенных способов анализа поведения нелинейных конструкций является построение зависимости между некоторой компонентой напряженно-деформированного состояния и интенсивностью нагрузки. Наглядность такого изображения не всегда удовлетворительна (рис. 17), физический смысл характерных точек таких кривых остается неясным.

Для большей наглядности полезно рассматривать другой параметр деформирования. Пусть, например, приложенная нагрузка $P(\lambda)$ характеризуется параметром интенсивности нагружения λ . Тогда можно

рекомендовать использование характеристической кривой $\lambda = \lambda(q)$, у которой перемещение q энергетически соответствует обобщенной силе λ в том смысле, что произведение λdq дает приращение работы обобщенной силы λ на приращениях перемещения dq . Например, для круглой пластины, нагруженной нагрузкой, равномерно распределенной по ее площади, характерным перемещением q будет не прогиб в центре, а объем тела, ометаемого перемещением срединной поверхности пластины при ее деформировании.

Характеристическая кривая обладает следующими важными свойствами:

- на устойчивых ветвях равновесных траекторий выполняется неравенство $dq/d\lambda \geq 0$;
- при наложении произвольной линейной связи абсолютная величина характерного перемещения не может увеличиться.

Программа как тренажер

Представляется, что компьютерная программа как раз и может стать таким тренажером. Ее использование позволяет изменить рецептурный подход и показать студенту «кухню» выработки конструктивного решения. При этом на конкретных примерах легко демонстрировать достоинства и недостатки сравниваемых вариантов. Кроме того, теоретическая парадигма в образовании заменяется экспериментальной, с той лишь разницей, что эксперимент является виртуальным.

В рамках такого подхода можно реализовать режим, когда студент, используя возможности программы, выполняет серию параметрических расчетов, исследуя влияние того или иного параметра конструкции на поведение конструкции (показатели прочности, устойчивости и т.п.). Типичный пример такого исследования – анализ влияния подъемности арки на распределение усилий.

Здесь важными являются два обстоятельства:

- Нужно дать студенту возможность ошибаться – анализ собственных промахов приносит знание.
- Работу выполняет студент, а разбор результатов выполняется совместно с преподавателем.

Нужно помнить, что студент не может освоить методику, используя программу, представляющую для него «черный ящик», который преобразует задаваемые исходные данные в некоторые результаты некоторым непонятным для обучающегося способом. В результате можно получить скорее вред, чем пользу. Неким выходом из положения является использование принципа максимальной прозрачности «черного ящика» с работой в пошаговом режиме (очередной шаг должен выбрать обучаемый, возможно из предложенного ему меню) и с возможным доступом к промежуточным результатам. Студент должен оценить каждый промежуточный результат и выбрать дальнейший план действий, включая

возможность возврата на несколько шагов назад и изменения параметров расчета. Таким способом обучающая программа активизирует роль студента, превращая его в лицо, получающее и оценивающее информацию и принимающее решения.

Учебник или курс

При описании конструктивных решений учебник часто попросту констатирует различные факты, вместо того, чтобы объяснить, из каких соображений они получаются. Вместо обучающей книги мы имеем иллюстрированный справочник (справочники тоже нужны, но не взамен учебников). При этом приводятся только примеры удачной проектировки, хотя было бы полезно указать и на неудачно выполненные конструкции, объяснив, в чем именно состоит неудача.

По этому поводу Робертом Стефенсоном давно было сказано

«Нет ничего более поучительного для молодых инженеров, чем отчеты об авариях больших сооружений, а также о средствах, используемых для исправления повреждений. Добросовестное изложение этих происшествий и способов, которыми исправляли их последствия, имеют большую ценность, чем описание самых успешных работ».



Роберт Стефенсон
(1803-1859)

Можно привести еще и мнение одного из основных разработчиков ракетно-космической техники Н.А. Пилогина: *«Один аварийный пуск дает нам для познания и улучшения системы больше, чем десяток благополучных»* [61]. Вообще, учебники все в большей степени становятся сборниками рецептов на манер кулинарной книги и при этом с каждым новым изданием «худеют». Так трехтомный учебник по курсу металлических конструкций (1940 – 1844 г.г.) имел объем (844 + 488 + 499) страниц, однотомный выпуск 1952 г. — 852 стр.; 1961 г. — 776 стр.; 1973 г. — 687 стр. Сегодня этот курс излагается на 560 страницах. Трогательная забота о студенте, который в период обучения в ВУЗе не может проработать чрезмерные объемы знания (и это верно), но абсолютно недалёковидная политика, если учесть, что профессиональная подготовка специалиста продолжается все время, и иметь систематизированный материал для самостоятельной проработки ему необходимо.

Зато как сорная трава разрастаются многочисленные методические пособия, суммарный объем которых намного превышает те сокращения, которые были сделаны в учебнике. Эти «методички», в которых расписано любое движение руки студента (но не его мысли) требуют от него только внимательности и исполнительности (возьми это число, подставь в эту формулу и т.д.), они не могут претендовать на материал для послевузовского использования, поскольку слишком сильно привязаны к учебному процессу, его делению на отдельные задания и части, специально упрощены и

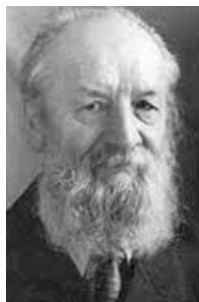
подогнаны под «уровень студенческого понимания». Мне представляется, что более серьезную дилемму в деле подготовки кадров для прикладных исследований было бы трудно придумать.

К сожалению, уменьшение объема учебника не всегда происходит за счет второстепенного материала. Желание научить практическим приемам заставляет оставлять страницы с детальными арифметическими выкладками, сохранять привязанность изложения не к общим принципам, а к требованиям норм проектирования, отказываться от анализа неудачных вариантов.

Думаю, что требуется отказ от точного следования сокращенной учебной программе, а нужна более широкая картина, ориентированная и на последующее (послеуниверситетское) чтение.

При этом появляется возможность думать не только о студенте, впервые знакомящемся с материалом, но и об интересах специалиста, уже имеющего некоторый опыт. Такой подход соответствует парадигме «специалист учится всю жизнь», а не широко распространенной, к сожалению, парадигме «научить на всю жизнь».

Естественно, что для первого варианта необходимо получить хорошую подготовку в области фундаментальных базовых дисциплин, что и позволит дальнейшее развитие и совершенствование профессионального уровня в режиме самообучения, и адаптацию к различным быстро меняющимся потребностям практики. Закладка такого фундамента является, на мой взгляд, основной задачей высшей школы.



А.Н. Крылов
(1863-1945)

А второй вариант обычно связан со стремлением получить готового специалиста и обучение при этом превращается в натаскивание. По этому поводу выдающийся ученый и организатор инженерного образования академик А.Н. Крылов сказал: *«Никакая школа не может дать готового инженера, руководителя цеха или самостоятельного конструктора, но она обязана дать основные знания ... тогда практика будет для него той непрерывной в течение всей жизни школой, в которой он не впадет в рутину, а с каждым годом будет совершенствоваться и станет руководителем производства или истинным конструктором»* [33]

Стиль преподавания

В подавляющем большинстве учебников по строительной механике авторы считают основные положения механики (по крайней мере, ее раздела «Статика») уже хорошо известными и поэтому также на них не останавливаются и не дают критического анализа этих основ механики. Создается впечатление, что авторы стремятся как можно скорее дать читателю в руки аппарат для решения задач, не задерживаясь на выяснении сути дела.

Современное состояние прикладной науки, заметная потеря ее связей с фундаментальными дисциплинами и определенная «хуторная» психология основных кафедр наложила свой отпечаток и на проблему подготовки кадров. Многие дисциплины растащены по отдельным курсам, каждая кафедра все больше углубляется в специфику своего направления и тем самым разваливает общие подходы. Мне трудно понять, почему нужно иметь отдельные кафедры (и, соответственно, курсы) стальных, железобетонных, деревянных конструкций, и при этом не иметь некой объединяющей их дисциплины.

Кто должен говорить об общих проблемах любых несущих конструкций (как обеспечивается их надежность, что такое живучесть конструкции, как и почему создаются смешанные каркасы, как связаны требования прочности и устойчивости с требованиями ремонтпригодности и обеспечением доступа к ответственным деталям для их осмотра, ремонта и замены и многое другое). Кто, наконец, расскажет о методе расчетных предельных состояний именно как об общем методе расчета любых несущих конструкций и при этом остановится не только на левой (несущая способность) но и на правой (воздействия) части предельного неравенства.

Вот и получается, что студента обучают, например, способам оценки прочности стальной или железобетонной балки, но ничего не говорят ему о свойствах тех нагрузок, для которых эта прочность должна обеспечиваться. Тому же студенту могут очень долго и детально говорить о том, что узел сопряжения стальной колонны с фундаментом может иметь такое или такое конструктивное решение и его расчет по действующим нормам выглядит таким-то образом, но ничего не говорят, почему нормы требуют выполнения той или иной проверки. Также остается в тени вопрос о том, какие именно неучтенные особенности поведения конструкций нашли свое отражение в нормируемом коэффициенте условий работы, или чем отличаются расчетные модели классического силового метода проверки сечений железобетонных конструкций от метода, в основе которого лежит деформационная модель.

При преподавании таких дисциплин, как сопротивление материалов или строительная механика мало внимания уделяется обоснованию принимаемых гипотез или анализу особенностей работы того или иного класса сооружений. Поэтому на вопрос «*Можно ли создать преднапряжение в статически определимой системе?*» слишком часто, к сожалению, отвечают положительно, ссылаясь на существование предварительно напряженной железобетонной балки.

О том, что она является внутренне статически неопределимой, во время обучения обычно ничего не говорится, и такое, например, соображение, что гипотеза плоских сечений, по сути, решает статически неопределимую задачу о распределении напряжений между фибрами изгибаемой балки, остается неизвестным ни из курса сопротивления материалов, ни из курса теории упругости. Единственным известным мне исключением является фундаментальный курс А.П. Филина, где эта проблема детально

анализируется (см. [59, стр.93], и, кроме того, указывается на то, что гипотеза плоских сечений, а также вытекающий из нее линейный закон распределения напряжений, неприменима в зонах стержня, где имеются резкие концентраторы напряжений (рис. 18).

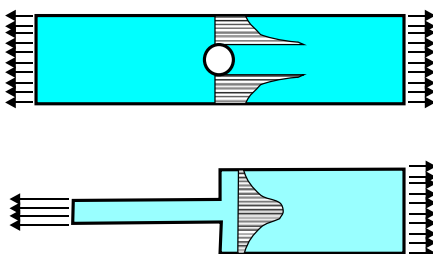


Рис. 18. Действительное распределение напряжений

Кстати, здесь же стоит сказать, что с физической точки зрения уместно рассматривать анализируемое поперечное сечение стержня как бесконечно тонкое и абсолютно жесткое тело с тремя степенями свободы. Тогда можно указать на то, что момент инерции сечения имеет физический смысл инерционной характеристики этого тела, и сопоставить его с геометрическим понятием момента инерции, рассматриваемом в сопротивлении материалов.

Рассмотрение одного и того же явления с различной точки зрения не только дает более глубокое понимание, но и способствует выработке инженерной интуиции, так необходимой в работе конструктора. Можно указать на интересный педагогический прием, придуманный Л.Г. Дмитриевым, когда ему пришлось столкнуться с необходимостью описания работы конструкций для аудитории с относительно слабой математической подготовкой (студенты Национальной академии изобразительного искусства и архитектуры). Понимая, что архитекторам в первую очередь следует понимать функциональное предназначение той или иной конструкции он просил обучающегося вычеркнуть на фотоизображении известного памятника архитектуры все, что не связано с прочностью и устойчивостью объекта. Таким способом у обучающихся выработывалась интуиция.

Но главное, по-видимому, состоит в том, что объяснения того «как» (рассчитать, проверить, выбрать и т.д.) должны уступать рассказам «почему». Объяснение физического смысла той или иной проверки важнее, чем, указание на то, что она предусмотрена нормами проектирования.

Разрывы и нестыковки в цепочке дисциплин

Цикл теоретических дисциплин в цепочке знаний о прочностных расчетах (теоретическая механика, сопротивление материалов, строительная механика, теория упругости и т.д.) идейно связан, но часто наблюдаются

разрывы и нестыковки в его практическом изложении. Можно заметить фрагментарность и разобщенность этого цикла курсов, их нацеленность не на преподавание фундаментальных основ соответствующих научных дисциплин, а на рассматривание, в узком смысле «практическое применение» отдельных (хотя и важных) приемов.

Дело в том, что по мере продвижения по упомянутой цепочке меняется предмет рассмотрения и, в связи с этим, вводятся некоторые уточняющие гипотезы и ограничения, о чем не всегда четко говорится, и в результате чего нередко получается путаница. Например, в разделе «статика» курса теоретической механики точку приложения силы можно было переносить по линии ее действия, а в сопротивлении материалов или в динамике материальной системы этого делать нельзя.

С другой стороны не вредно напоминать о понятиях и свойствах, которые остаются неизменными (например, момент инерции, число степеней свободы, обобщенные координаты и силы, потенциальная энергия, метод кинестатики и т. п.). В указанных дисциплинах часто дают не общие определения этих понятий, а более простые определения, достаточные для данной дисциплины, хотя обращение к общему определению полезно.

Особенно важны такие общетехнические понятия, как консервативность или неконсервативность системы. Именно здесь проявляется не всегда упоминаемое, но важное различие между геометрической нелинейностью упругой системы, когда в силу консервативности результат расчета не зависит от последовательности приложения нагрузки, и физической нелинейностью, этим свойством не обладающей.

Например, полезно указать на то, что обычно применяемая форма расчета сжато-изгибаемого элемента неявно предполагает, что момент и продольная сила вызваны одним и тем же нагружением, а в противном случае результат может зависеть от последовательности их возникновения. И оговорить, что когда такая последовательность неизвестна, то их одновременный учет (а он присутствует в нормах проектирования) является условным.

Библиография

1. ASCE/SEI 4-16. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary - Reston, Virginia, USA, 2017.
2. De Biagi V. Structural behavior of a metallic truss under progressive damage // International Journal of Solids and Structures, 2016, Vol. 82, pp. 56-64.
3. De Biagi V., Chiaia B. Complexity and robustness of frame structures // International Journal of Solids and Structures, 2013. Vol. 50(22), pp. 3723-3741.
4. EN 1991-1-7. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1–7: General actions. Accidental actions. – Brussels: CEN, 2006
5. Hutchinson J.W., Koiter W.T. Postbuckling theory // Applied Mechanics Reviews, 1970, 23, No 12 — P. 1353-1366.
6. Jiang J., Zhang O., Li L., Chen W., Ye J., Li G-O. Review on Quantitative Measures of Robustness for Building Structures Against Disproportionate Collapse // International Journal of High-Rise Buildings, 2020, Vol. 9, No 2 – P. 127-154 <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2020.9.2.127>
7. Nafday A.M. System Safety Performance Metrics for Skeletal Structures // Journal of Structural Engineering, 2008, Vol. 134, No. 3, pp. 499-504.
8. Perelmuter A.V., Lyakhovich L.S. Some Questions on Optimal Structural Design of Building Structures // Aktualne Problemy Konstrukcji Metalowych. – Gdansk: Politechnika Gdanska, 2014 — P. 178-181.
9. Perelmuter A.V., Veriuzhska T.Y. Optimization of the overload-protection degree // Engineering Optimization IV — London: Taylor & Francis Group, 2014. — P. 529–532.
10. Perelmuter A.V., Pichugin S.F. Issues on estimation of building structure vulnerability // Magazine of Civil Engineering, 2014, №5 — P. 5-14.
11. Starossec U., Haberland M. Approaches to measures of structural robustness // Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7 (7-8) — P. 625-631.
12. Thompson J. M. T. Optimization as a generator of structural instability // Int. J. Mech. Sci., 1972, v.14, N 9 — P. 627-629.
13. Балдин В.А. К вопросу нахождения оптимальных соотношений элементов промздания // Сборник трудов МИСИ им. В.В. Куйбышева, №1 — М.: Стройиздат, 1937 — С.32-80.
14. Балдин В.А. К вопросу определения оптимального шага ферм // Проект и стандарт, 1935, №4
15. Бараненко В.А., Сопильняк А.М. Концепция критерия энергоемкости в анализе и оптимизации стержневых систем. Вісник // Сб. научных трудов. Вып. 6-7,-Дн-вск, ПГАСА, 2008.- С 18-21
16. Васильков Г.В. Теория адаптивной эволюции механических систем – Ростов-на-Дону: Терра-Принт, 2007 – 248 с.
17. Васильков Г.В. Эволюционная теория жизненного цикла механических систем. Теория сооружений – М.: ЛКИ, 2008 – 320 с.
18. Васильков Г.В. Эволюционные задачи строительной механики. Синергетическая парадигма [Текст] / Г. В. Васильков. – Ростов-н/Д: Инфосервис, 2003 – 179 с.
19. Вахуркин В.М. Выбор расстояния между элементами металлических несущих конструкций перекрытия // Проект и стандарт, 1935, №4 — С. 21-28.

-
20. Вахуркин В.М. Зависимость расхода металла конструкций цехов в зависимости от сетки колонн // Проект и стандарт, 1934, №10 — С. 25-29.
 21. Велихов П.А. Теория инженерных сооружений — М.: Госстройиздат, 1924 — 304 с.
 22. Виноградов А.И. Об учете собственного веса в стержневых системах заданными напряжениями // Исследования по теории сооружений. Вып. VIII. — М.: Госстройиздат, 1959 — С. 523-534.
 23. Герасимов Е.Н., Дышкант А.В. Коэффициент использования материалов в задачах структурно-параметрического синтеза // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация: Межвуз. сб. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 1997. — С. 43-50
 24. Гордон Дж. Конструкции или почему не ломаются вещи — М.: Мир, 1980 — 390 с.
 25. Гуковский М.А. Механика Леонардо да Винчи М.: Изд-во АН СССР, 1947 — 815 с.
 26. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи. – Київ: Мінрегіонбуд, 2018. – 67 р.
 27. Дехтяр А.С. До вибору конструкцій прольотних будов // Дороги і мости, 2008, вип. 9 С. 70-75.
 28. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений // Математика сегодня – М.: Знание, 1974 – С. 5-49.
 29. Кирпичев В.Л. Беседы о механике / Издание 5-е.— М.-Л.: Гостехтеориздат, 1951.
 30. Комаров А.А. Основы проектирования силовых конструкций. — Куйбышев: Куйбышевск. книж. изд., 1965, 82 с.
 31. Комаров В.А. Конструкция и проектирование несущих поверхностей летательных аппаратов — Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. — 96 с
 32. Корчак М.Д., Галкин С.В., Картопольцев В.М. Основы неустойчивости в теории катастроф инженерных конструкций — Томск: Изд-во Томского университета, 1987 — 124 с.
 33. Крылов А.Н. Воспоминания и очерки — М.: Восениздат, 1949 — С. 434 с.
 34. Лейтес С.Д. К проблеме законов веса стальных стропильных ферм // Проект и стандарт, 1934, №10 — С. 21-25.
 35. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций — М.: Стройиздат, 1979 — 319 с.
 36. Малков В.П., Угодчиков А.Г. Оптимизация упругих систем — М.: Наука, 1981 — 288 с.
 37. Малков В.П. Энергоемкость механических систем – Н. Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 1995 – 258 с.
 38. Мельников Н.П. Основные принципы и задачи теории формообразования металлических конструкций // Исследование и развитие конструктивной формы металлических конструкций (Материалы по металлическим конструкциям, Вып. 21) — М.: Стройиздат, 1977 — С. 3-20.
 39. Никонов Н.Н. Большепролетные покрытия. Анализ и оценка: Учебное пособие— М.: Изд-во АСВ, 2000.— 400 с.
 40. Новожилов В.В. Математические модели и точность инженерных расчетов // Судостроение.— 1979.— №7.— С. 5-12.
-

-
41. Облегченные несущие металлические конструкции — М.: Госстройиздат, 1963 — 282 с.
 42. Патон Е.О. Вес железных мостов для железных и линейных дорог — К.: Изд-во Политехнического института, 1903 — 53 с.
 43. Перельмутер А.В. Внесок елементів системи у її статичну невизначеність // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 111. – С. 93-108.
 44. Перельмутер А.В. Концепция концентрации материала и требования безопасности // Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Сб. трудов. — М.: МГСУ, 2011 — С. 286-291.
 45. Перельмутер А.В. Сопоставление конкурирующих результатов расчета // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2016, №3 — С. 104-113.
 46. Перельмутер А.В. Управление поведением несущих конструкций— М. . Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011 — 184 с.
 47. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Повышение качества расчетных обоснований проектов // Бюллетень строительной техники, 2005, №10 — С. 59-62.
 48. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа — М.: ДМК Пресс, 2007 — 600 с. (Серия «Проектирование»)
 49. Помазан М.Д. Принцип минимума и равномерности для рационализации // Международный научный журнал, 2016 — С. 85-88.
 50. Пуанкаре А. О науке. — М.: Наука, 1983.
 51. Рабинович И.М. Курс строительной механики. Часть II. Статически неопределимые системы — М.: Госстройиздат, 1954 — 546 с.
 52. Рабинович Б.И., Брусиловский А.Д. От баллистической ракеты Р-1 до космического комплекса Энергия - Буран. О людях и свершениях — М.: Ин-т космических исследований РАН, 2009 — 477 с.
 53. Райзер В.Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений — М.: Изд-во АСВ, 2018 — 396 с.
 54. Рейтман М.И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел — М.: Наука, 1976 — 258 с.
 55. Саламахин Н.М. К методу обобщения закономерностей веса несущих конструкций в функции определяющих параметров // Строительная механика и расчет сооружений, 1980, №5 — С. 11-15.
 56. Стрелецкий Н.С. О методике определения стоимости стальных конструкций во время процесса проектирования // Материалы по стальным конструкциям — М.: 1958 — С. 3-13.
 57. Стрелецкий Н.С. Основы законов веса металла в промышленных конструкциях // Сборник статей по металлическим конструкциям, 1934 — С. 3-37.
 58. Стрелецкий Н.С., Стрелецкий Д.Н. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций — М.: Стройиздат, 1964 — 360 с.
 59. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Том 1 — М.: Наука, 1975 — 832 с.
 60. Хайно Энгель. Несущие системы : пер. с нем. – М. : АСТ : Астрель, 1997 – 344 с.
 61. Черток Б.Е. Ракеты и люди. Лунная гонка, — М.: РТСофт, 2004 — 544 с.
-

-
62. Шмуклер В. С. Новые энергетические принципы рационализации конструкций // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту, 2017, вип. 167 — С. 54-69.
 63. Шмуклер В.С., Климов Ю.А., Бурак Н.П. Каркасные системы облегченного типа — Харьков: Золотые страницы, 2008 — 336 с
 64. Шулов В.Г. Расчет нефтяных резервуаров // Избранные труды. Строительная механика М.: Наука, 1977, С. 44-46.

Содержание

Введение	3
Теория сооружений и строительная механика	6
Компьютеризация расчетов.....	10
Детализация и уточнение расчетов.....	12
Отношение к нагрузкам и воздействиям.....	13
Теория сооружений и нормы проектирования	15
Исследование закономерностей конструктивных решений.....	18
Законы веса и выбор типа конструкции.....	18
Предельные параметры.....	22
Принцип концентрации материала	25
Нетрадиционные способы анализа.....	28
Проблемы осмысления и понимания.....	28
Использование упрощенных моделей.....	29
Оценка роли отдельных элементов	30
Пути передачи нагрузки	30
Равнопрочность, равноустойчивость, равнонадежность	32
Потенциальная энергия деформаций как инструмент анализа	35
Проблема неуставливаемых воздействий	38
Максимизация энергии воздействия	39
Оценка живучести	40
Проблемы обучения	43
Дифференцирование уровней подготовки	43
Демонстрация поведения.....	47
Программа как тренажер	50
Учебник или курс	51
Стиль преподавания.....	52
Разрывы и нестыковки в цепочке дисциплин	54
Библиография	56
Содержание	60