

# Проблемы повышения качества расчетных обоснований проектов

*Перельмутер А.В.*

Письмо Главгосэкспертизы России №24-10-3/1281 от 28.06.04 для повышения качества расчетных обоснований «современных сложных объектов строительства» требует «...осуществлять расчеты не менее чем по двум сертифицированным, независимо разработанным и проверенным в практике программным комплексам, проводить сопоставительный анализ полученных результатов». Проблема имеет технический, юридический и организационный аспект. Подняв ее Главгосэкспертиза безусловно сделала важное дело, однако во многом поднятые вопросы остались без ответов, т.е. и здесь «хотели, как лучше, а получилось, как всегда».

Ниже представлены некоторые соображения по вопросам, которые возникают при анализе предложений Главгосэкспертизы России. Следует отметить, что эти соображения высказываются разработчиком программных систем и что у пользователей могут появиться и другие вопросы (например, проблема удорожания и замедления проектирования, которые должны быть каким-то образом компенсированы).

## Что значит «ответственный объект»

Главгосэкспертиза России, определяя область действия своих рекомендаций, указывает на объекты, не имеющих в отечественной практике ранее запроектированных и построенных аналогов (современные высотные здания, уникальные торговые, спортивные и зрелищные объекты с большепролетными покрытиями, здания сложной архитектурной формы, в том числе возводимые в сейсмических районах и т.п.). Этот список принципиально не может быть полным и всегда останутся вопросы о том, что такое апробированный аналог или начиная с какого размера начинаются большепролетные конструкции.

Понятие «ответственный объект» является достаточно расплывчатым и при трактовке различными сторонами инвестиционного процесса толкуется с заметными разночтениями. Для того, чтобы избежать спекуляций и снять неопределенность можно, на наш взгляд, использовать ГОСТ 27751-88 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету», где разделом 5 установлено три уровня ответственности зданий и сооружений (I-повышенный, II-нормальный и III-пониженный).

Представляется разумным считать ответственными те объекты, которые классифицируются ГОСТом как имеющие уровень I. Поскольку ГОСТ определяет, что отнесение объекта к конкретному уровню ответственности производится генпроектировщиком по согласованию с заказчиком, и при этом производится выбор значений коэффициентов надежности по ответственности  $\gamma_p$ , то всякого рода послепроектные требования экспертизы или других надзорных органов об изменении этого уровня следует считать не соответствующими стандарту.

Конечно, возможно и создание специального руководящего документа, где будут расшифрованы общие положения ГОСТ 27751-88, однако полагаться здесь только на некоторые субъективные представления любых лиц и организаций было бы неверным.

## **Что такое «независимо разработанные» программные комплексы**

подавляющее большинство программных систем основаны на одних и тех же предпосылках (например, методах конечноэлементного анализа), при этом разработчики заимствуют любые доступные (опубликованные в научной печати, описанные в документации, подсмотренные на демонстрациях и т.п.) находки своих конкурентов. В идейном плане «независимая разработка» представляет собой мираж (не путать с программой МИРАЖ).

Если исходить из авторства, то при оценке степени независимости разработок возможны ошибки, поскольку авторские коллективы трансформируются, распадаются, мигрируют и т.п. С другой стороны, даже внутри одной и той же организации вполне возможно создание относительно различных программных систем.

В чем же смысл требования «независимости»? Наверное в попытке избежать ошибок, которые могут быть присущими однотипным расчетным моделям.

Думаю, что здесь следовало бы говорить о программных системах, основанных на различных подходах к описанию расчетной модели объекта. Но тогда не меньшую (а, возможно, значительно большую) доказательную силу имело бы сопоставление результатов расчета по двум (нескольким) расчетным моделям, независимо от того, реализованы ли они в различных и «независимо разработанных» программных комплексах или в одном.

## **Использование разных расчетных схем**

При проектировании современных ответственных объектов все чаще используются весьма сложные и чрезмерно детализированные расчетные схемы. Избыточная детализация системы в целом часто является реакцией расчетчика на потребность в точных данных по экстремальным результатам при отсутствии предварительной информации о месте появления такого результата. Тогда на всякий случай применяется детализированная расчетная схема, которая возможно позволит не пропустить необходимый результат.

Но нужно учитывать, что указанный результат может быть все равно упущен из-за трудности анализа и осмысления избыточной информации. Дело в том, что начиная с некоторого уровня сложности системы способность человека формулировать осмысленные и точные утверждения о поведении системы начинает резко падать. Здесь имеет место некоторый аналог принципа неопределенности Гейзенберга в отношении детальности и информативности результатов расчета, которые выступают в роли альтернирующих параметров.

Имея дело с задачами большой размерности, расчетчик должен в некотором смысле уподобиться художнику-карикуристу, который воспроизводит оригинал не во всех деталях, подобно фотографическому аппарату, но упрощает и схематизирует его таким образом, чтобы подчеркнуть наиболее характерные черты. Хорошая расчетная схема большой системы является лишь профессиональной «карикатурой» (или дружеским шаржем), утрирующей и подчеркивающей наиболее характерные свойства оригинала и игнорирующей все остальное. Наиболее полное и многостороннее представление, естественно, может быть получено в том случае, когда оригинал представлен целой серией карикатур, каждая из которых посвящена другой характерной черте оригинала.

Таким образом, использование нескольких расчетных схем, которые, в какой-то мере взаимно дополняют друг друга и ориентированы на различные свойства системы, позволяет провести более тщательный анализ. При этом одновременно достигается и другой результат,

парируются возможные ошибки, поскольку необходимость в объяснениях расхождения результатов расчета по разным схемам, довольно быстро локализует причины таких расхождений. Но отсюда также следует вывод о бесполезности (даже вредности) использования конверторов исходных данных из одной программы в другую, поскольку при этом обе программы фактически оперируют с одной и той же расчетной моделью (и с одними и теми же возможными ошибками).

## **Как проводится сопоставительный анализ**

В письме Главгосэкспертизы отмечается, что результаты расчета «могут значительно отличаться для сложных объектов при использовании различных ПК и при использовании различных расчетных моделей». Целиком соглашаясь со вторым утверждением, хочу возразить по поводу первого. Существенное различие результатов для одной и той же расчетной модели при ее проверке разными программными кодами говорит лишь о наличии ошибок в одном из них, и поскольку предполагается использование сертифицированных и апробированных программ, то здесь имеется явное противоречие.

Расчетное обоснование проектных решений это многоэтапный процесс в котором как минимум следует различать две основные части: определение напряженно-деформированного состояния (НДС) и проверку принятых сечений (армирования).

Следует иметь некоторую меру, с использованием которой принимается решение об удовлетворительном (не удовлетворительном) результате сопоставления. Ведь в инженерно-технических расчетах (в отличие от бухгалтерских) полного совпадения результатов не бывает. Общепринятая норма схожести в виде пятипроцентного расхождения также должна быть конкретизована и необходимо уточнить к каким результатам (перемещения, усилия и т.п.) и к каким значениям (экстремальные, средние или другое) она должна относиться. Эта проблема во многом была бы смягчена, если бы сопоставление вел только проектировщик. Однако, переданные экспертизе, такого рода сопоставления станут предметом многочисленных и чаще всего беспредметных дискуссий.

Сопоставление результатов определения НДС наталкивается на техническую трудность, связанную с огромным числом сопоставляемых результатов, однако эта трудность принципиально преодолима. Хуже обстоит дело с различиями, вытекающими из расхождения понятийного языка, описывающего НДС сопоставляемых моделей. В книге [1] предложен алгоритм сопоставления, основанный на анализе распределения энергии деформаций по конструктивной схеме, однако он скорее всего может использоваться в рамках сопоставления НДС различных расчетных схем одного и того же физического объекта при анализе этих схем в рамках одного программного комплекса, в котором такое сопоставление может быть выполнено в автоматизированном режиме.

В соответствии с этим алгоритмом конструируется усредненная оценка различия сравниваемых расчетных моделей путем сопоставления упругих потенциалов для системы в целом и любой ее части. Поскольку полный перебор любых частей расчетной схемы может оказаться слишком сложным (а для континуальных систем попросту невозможным), то предлагается ограничиться некоторой выборкой случайных подсхем. В качестве элементов выборки используется набор конечных элементов, целиком попадающих в некую случайно назначаемую связную область пространства, занимаемого конструкцией. В такую область будут попадать различные для разных моделей части расчетной схемы, но при достаточно большом числе попыток "ошибка дискретизации подсхем" играет небольшую роль.

## **Нормативные требования и сертификация**

Несколько слов о сертификации программных продуктов. В настоящее время сертификат служит для подтверждения соответствия требованиям действующих норм. Однако ядро расчетного программного комплекса ориентировано на определение параметров напряженно-деформированного состояния, а эта функция принципиально не нормируема. Процедура верификации программных систем не регламентирована никакими общими требованиями и остается прерогативой разработчиков, хотя необходимость такого рода регламентации осознана давно и даже практически реализована в системе Госатомэнергонадзора (кстати, отсюда должен следовать и более высокий уровень доверия к программам, обладающим сертификатом этого ведомства).

А собственно сертификация программ на соответствие нормам связана с решением важной **проблемы содержания нормативных требований** и их соответствия условиям проектирования. Например, подавляющее число современных сложных зданий включают несущие железобетонные конструкции плоскостного типа (перекрытия, стены, диафрагмы жесткости), а нормы проектирования упорно игнорируют этот конструктивный тип, оставаясь, как и пятьдесят лет назад, ориентированными только на проверку стержневых элементов. Разработчики отечественных программных систем создают модули проверки плоскостных элементов, основываясь на методике Н.И. Карпенко [2], однако реализуя эту методику по-разному. Это заведомо ведет к различным результатам и порождает споры о корректности того или иного подхода к реализации рекомендаций работы [2].

Аналогичные проблемы с ненормированными подходами к проверке несущей способности конструкций возникают при учете физической нелинейности поведения материала, проверке стальных стержневых конструкций на кручение, назначению расчетных длин и в других случаях. О расчетных длинах стоит рассказать особо. Этот прием проверки устойчивости, предложенный более ста лет назад Ф.С. Ясинским [3], принципиально рассматривает только плоские случаи выпучивания и не может быть применен в тех случаях, когда стержень выпучивается по пространственной кривой (что, например, тогда должна обозначать фраза «расчетная длина в плоскости  $x-x$ »?). Кроме того, как давно показано А.Р. Ржанициним [4] понятие расчетной длины в классическом смысле анализа устойчивости равновесия не применимо к проверке по предельной гибкости. Все это вызывает определенные сложности при разработке программных систем универсального типа, а при их использовании возможны некоторые несуразности, если только уточненное решение на ЭВМ не соответствует упрощающим гипотезам, положенным в основу используемого понятия расчетной длины.

Не снимая вопроса о необходимости введения в нормы проектирования новых разделов, отсутствующих там в силу ориентации нормативной документации на ручной расчет, следует четко отдавать себе отчет в том, что, по-видимому, отставание сформулированных в нормах требований к расчетным проверкам от возможностей, предлагаемых программными системами, будет существовать всегда. Поэтому следовало бы соблюдать следующее общее правило: если в программной системе присутствуют предложения, выходящие за рамки формулировок норм проектирования, то они **обязательно должны быть подробно описаны** в технической документации программного комплекса со ссылкой на литературные источники, необходимыми формулами и т.п. Соблюдение этого требования может быть одним из элементов проверки при сертификации программной системы.

У этой проблемы есть и другая сторона — требуемое СНиП 11-01-95 подтверждение соответствия разработанной проектной документации государственным нормам, правилам, стандартам или же оформленные в установленном порядке согласования об отступлениях от действующих нормативных документов касается вопросов, которые нормами регламентируются. Однако следовало бы требовать и сведений об использованном программном обеспечении, тогда будет ясно и то, каким образом разрешены вопросы еще не отраженные в нормах проектирования.

## О возможном нормировании правил определения НДС

Требования и рекомендации по выбору расчетных моделей обычно обосновываются специальными исследованиями, результаты этих исследований закрепляются традицией и практикой проектирования, а иногда (достаточно редко, впрочем) отражаются в нормах проектирования. Этими же нормами могут быть определены и возможные конструктивные решения, обеспечивающие реализацию принятых расчетных предпосылок. К сожалению, эти положения не очень часто выполняются на практике. Требования норм, как правило, связаны с определенной расчетной моделью, но ее описание в нормативном документе не приводится и создается ложное впечатление универсальности нормативного требования. Если при этом нормативное требование построено на использовании достаточно грубой расчетной модели, то зачастую создается следующая парадоксальная ситуация — уточнение расчетной модели приводит к менее экономичным решениям, чем те, которые основаны на грубой модели нормативного документа.

По-видимому правильным выходом из рассматриваемой ситуации является установление некоторых правил обоснования расчетных моделей. Первый шаг в этом направлении сделан разработчиками Еврокода [5], в который включено специальное приложение с указанием правил обоснования значений тех или иных параметров, входящих в расчетные зависимости норм. В этом же документе четко оговаривается, что в случае использования расчетных моделей, которые не имеют надежного теоретического обоснования или же не подтверждены практикой строительства, требуется экспериментальное подтверждение их пригодности. Кроме того, в других частях Еврокода даются рекомендации относительно применения линейного или нелинейного расчета, в зависимости от соотношения некоторых параметров конструкции. Представляется, что, как минимум, должны быть опубликованы хотя бы грубые описания тех расчетных моделей, на которые ориентировались составители нормативных документов. В настоящее время такие сведения найти весьма затруднительно.

Некоторые нормативные документы рекомендуют использовать нелинейный расчет. Вообще, учесть эффекты геометрической и физической нелинейности для большинства используемых расчетных схем современных зданий и сооружений в принципе не очень сложно. Попытка преодоления условности линейного расчета путем выполнения расчета в «физически нелинейной постановке» будет оправдана лишь в том случае, когда такой расчет является корректным (например, пластическое поведение материала не заменяется нелинейно-упругим<sup>1</sup>), но отсутствие четких сведений о том, каков же подход реализован в программной системе и каковы ограничения на его применение и здесь создает определенные препятствия.

Однако сложности начинаются после выполнения нелинейных расчетов. Дело в том, что если не выполняется принцип суперпозиции, то неизвестно что нужно делать с результатами нелинейных расчетов, выполненных для различных случаев нагружения системы. Выделить одно определяющее нагружение из множества возможных в большинстве случаев не удастся (редкие исключения, например, конструкции плотины, где расчетное нагружение очевидно, лишь подтверждают этот тезис). А систем, работающих только на один вариант нагружения, практически не бывает.

Таким образом, приходится мириться с тем, что большинство массовых расчетов будет выполняться по схемам, для которых адекватность реальной работе сооружения достаточно сомнительна, и необходимая «балансировка» будет достигаться путем использования некоторых усредненных поправочных коэффициентов (таких, как коэффициент условий работы  $\gamma_s$ ), значения которых обосновываются экспериментально. В этих условиях еще большему сомнению следует подвергнуть увлечение использованием переусложненных расчетных схем.

Возвращаясь к вопросу об использовании результатов нелинейного расчета, отметим что всякого рода нормативные проверки прочности и устойчивости элементов конструкций «с учетом пластической стадии работы», при которых используются усилия, найденные в результате упругого расчета системы, являются в значительной мере условными (по крайней мере для элементов статически неопределимых систем) и эта условность должна в полной мере осознаваться. Аналогичное замечание относится и к использованию расчетных длин сжатых элементов, которые определяются путем расчета упругой системы на устойчивость. Насколько корректен такой бифуркационный расчет в упругой стадии по отношению к реальной работе конструкции, где на потерю устойчивости оказывает влияние совместные эффекты текучести материала и геометрической нелинейности, остается неясным. Вместе с тем, от того, будет ли при проверке стального стержня коэффициент свободной длины принят равным 0,75 или 0,85, теоретическое значение несущей способности зачастую зависит больше, чем от величины коэффициента формы сечения, с помощью которого учитывается неупругое выпучивание.

## **Выводы и предложения**

1. Проблема, поднятая письмом Главгосэкспертизы России, чрезвычайно важна и актуальна, но практическая реализация содержащегося там предложения об использовании расчетов по разным программным системам ее решает лишь в малой степени.
2. Для решения поднятой проблемы необходимо выполнение ряда исследовательских работ и подготовка соответствующих рекомендаций. Такую работу было бы целесообразным провести Академии архитектурных и строительных наук России совместно с основными коллективами разработчиков программных систем. Фирма SCAD Soft готова участвовать в такой работе безвозмездно, мы надеемся, что таким же образом поступят и другие организации-разработчики.
3. Назрела необходимость создания ассоциации легальных пользователей расчетных программных комплексов по типу известной международной ассоциации NAFEMS или комитета №60 «Verification and Validation in Computational Solid Mechanics» американского общества инженеров-механиков (ASME), которая могла бы взять на себя роль организатора верификации программных систем и информирование на своем веб-сайте о результатах такой верификации.
4. Желательно, чтобы Главгосэкспертиза России в порядке разъяснения своего письма №24-10-3/1281 официально подтвердила рекомендацию об анализе конструкций по нескольким расчетным моделям (как в рамках одного, так и с использованием разных программных комплексов), но сняла предложение об использовании конверторов, а также уточнила со ссылкой на ГОСТ 27751-88 класс объектов для которых такой подход является обязательным.
5. Целесообразно опубликовать результаты состоявшегося обсуждения на страницах научно-технической периодики.