

ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ КОНСТРУКЦИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.В.Доронин

Учреждение РАН Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО
РАН, Красноярск

MODELING PROBLEMS FOR ENGINEERING SYSTEMS STRUCTURES APPRAISAL

S.V.Doronin

Institution of RAS Special Design and Technological Bureau «Nauka» of the KSC SB RAS,
Krasnoyarsk

There is considered a general approach to engineering systems structures appraisal in connection with mathematical, phenomenological and empirical models which are in the base of these systems designing. Reasoning using models to rise technical level of the systems is one of the appraisal aims.

Конструкции технических систем представляют собой материальные объекты, обладающие комплексом свойств, которые можно разделить на два больших класса: расчетные свойства и нерасчетные свойства. К расчетным свойствам относятся те, которые являются объектом рассмотрения, анализа, обеспечения на этапе проектировании с использованием методов, регламентируемых отраслевыми нормативными документами. Нерасчетными свойствами, напротив, являются те, обеспечение которых не предусматривается действующими нормативными требованиями к техническим системам того или иного типа и методам их проектирования. Именно комплекс нерасчетных свойств является ответственным за значительную часть непрогнозируемых инцидентов, возникающих при эксплуатации технической системы в штатных и нештатных режимах функционирования.

Одна из целей научно-технической экспертизы конструкций на этапах их проектирования и эксплуатации заключается в исследовании комплекса нерасчетных свойств технической системы и оценке их влияния на ее поведение как в штатных режимах функционирования, так и при наличии дефектов и повреждений, возникновении нерасчетных режимов нагружения вследствие комплексного взаимодействия технических, технологических, природных, субъективных и других факторов. Результатом такого исследования являются целенаправленные воздействия на конфигурацию технической системы (изменение структуры системы, свойств ее элементов и способов их взаимодействия), технологию ее проектирования (изменение структуры, свойств, взаимодействия виртуальных моделей элементов системы при ее автоматизированном проектировании, перечня расчетных случаев нагружения) и применяемые методы проектных расчетов (определение условий обеспечения эффективности решаемых задач проектных расчетов, постановка и решение новых для данного типа технической системы задач проектных расчетов), уменьшающие в конечном итоге долю нерасчетных и увеличивающие долю расчетных свойств (рис. 1). Таким образом, отличительной особенностью научно-технической экспертизы конструкций технических систем является не столько повторение и оценка адекватности принятых при проектировании решений, сколько постановка и решение новых задач, способствующих как повышению технического уровня системы, так и регламентирующих «технологию» этого повышения.

Такое исследование требует использования адекватных математических (феноменологических, эмпирических) моделей процесса, явления, непосредственно связанных с этими нерасчетными свойствами, что предполагает глубокого понимания особенностей функционирования технической системы и ее взаимодействия с окружающей средой.

Обоснование перечня и содержания комплекса указанных моделей осуществляется в

рамках экспертизы конструкций технических систем путем осуществления следующих логических цепочек процедур:

для конфигурации конструкции: анализ конструкторской документации → декомпозиция системы → установление возможных предельных состояний → определение процессов и явлений, приводящих к установленным предельным состояниям → выбор моделей этих процессов и явлений и оценка их количественных параметров;

для технологии проектирования: анализ технологии создания проектной документации → анализ виртуальных моделей конструкции и ее элементов в рамках применяемых систем автоматизированного проектирования → анализ адекватности и полноты принимаемых случаев нагружения → обоснование моделей конфигурации технической системы и взаимодействия с окружающей средой (расчетных случаев нагружения);

для применяемых методов проектных расчетов: установление моделей, положенных в основу методов проектных расчетов → анализ соответствия этих моделей установленным в ходе экспертизы особенностям функционирования конструкции и ее элементов → обоснование эффективных моделей для применения при проектных расчетах.

В значительном числе случаев указанные логические цепочки реализуются одновременно и взаимосвязано на всех этапах экспертизы.



Рис. 1. Взаимосвязь свойств конструкции с моделями, используемыми при проектировании и экспертизе

Некоторые аспекты приведенных выше общих рассуждений иллюстрируются анализом моделей и методов, положенных в основу расчетов деталей пневмоударников как элементов ударных систем.

Теоретической базой расчета деталей машин ударного действия для разрушения горных пород являются аналитические модели технической теории удара и основанные на них методы расчета ударных систем.

Анализ теоретических исследований и инженерных расчетов деталей машин ударного действия для разрушения горных пород позволяет констатировать, что

а) допущения и предположения, положенные в основу одномерной волновой теории продольного удара и ее модификации, приводят к весьма упрощенному описанию волновых процессов, протекающих в трехмерных деталях сложной конфигурации при их импульсном нагружении;

б) отсутствует общепринятая точка зрения на природу физико-механических процессов, протекающих в деталях машин ударного действия. Вследствие этого не сформулированы требования к аналитическим моделям и методам, которые могут быть положены в основу проектных расчетов пневмоударников;

в) разработанные до настоящего времени аналитические методы расчетов не позволяют учесть наличие геометрических особенностей деталей, влияние которых не сводится к изменению площади поперечного сечения деталей. К таким геометрическим особенностям следует, в первую очередь, отнести конструктивные концентраторы напряжений;

г) следствием ограниченных возможностей применения аналитических моделей и методов для проектных расчетов объемных деталей сложной конфигурации, каковыми являются детали машин ударного действия для разрушения горных пород, является отсутствие как государственных стандартов, так и отраслевых нормативов на расчеты прочности и ресурса этих деталей.

Наиболее систематизировано современные инженерные методы расчета деталей пневмоударников изложены в [1]. Суть этих методов сводится к следующему.

1. Выбор той или иной модели соударения двух тел и определение на этой базе максимального динамического усилия в деталях.

2. Вычисление максимумов напряжений в деталях в зонах концентрации с использованием гипотезы неплоских сечений и обобщения обширных экспериментальных исследований напряженного состояния натуральных деталей и их плоских моделей. Результаты этих вычислений оказываются хорошо согласованными с экспериментальными данными при квазистатическом нагружении деталей.

3. Расчет усталостной долговечности деталей осуществляется для двух стадий:

а) стадии зарождения усталостной трещины (в терминах [1] – «в безопасной зоне»)

$$N_1 = [\chi \cdot l_n \cdot (\sigma - \sigma_0) / (\sigma - \sigma_0 - \lambda)] (\sigma^3 \cdot B \cdot \gamma)^{-1},$$

где χ – константа материала, значения которой устанавливаются опытным путем; σ – действующее напряжение (его максимум в зоне концентрации); σ_1 – физический предел выносливости материала для гладких образцов; λ – константа зависящая от внутреннего строения материала; B – размер зерна материала; γ – структурная константа;

б) стадии развития усталостной макротрещины (в терминах [1] – «в докритической зоне»):

$$N_2 = \int_{[l]}^{l_1} dl / \left(\int_{K_0}^{K_c} K^3 dK / \psi \right),$$

где $[l]$ – предельный размер начального дефекта; l_1 – размер трещины вызывающий хрупкое разрушение; K_0 – значение коэффициента интенсивности напряжений от действия первичных остаточных напряжений; ψ – работа пластической деформации материала, вызванная ростом коэффициента интенсивности напряжений K и снижением трещиностойкости K_C в процессе работы.

Впоследствии общий ресурс вычисляется как

$$N = N_1 + N_2.$$

Рассмотрение сущности описанной инженерной методики расчета деталей позволяет констатировать следующие факты.

1. Определение максимального динамического усилия – единственный пункт методики, который при соответствующем выборе модели соударения в какой-то степени позволяет учесть волновой характер поведения деталей. Но даже здесь фактически используется «квазистатическая идеология» расчета, поскольку его результатом является максимальное значение усилия в цикле соударения P_{max} и игнорируется изменение этого усилия во времени $P(t)$. Соответственно максимальные напряжения в зонах концентрации вычисляются для принимаемого «по умолчанию» квазистатического напряженного состояния.

2. Использование для вычисления ресурса формул, в которых напряженное состояние учитывается единственным значением σ (или зависящим от него K), фактически означает, что расчет выполняется для гармонического регулярного процесса нагружения, при котором один цикл нагружения соответствует одному соударению деталей, т.е. одному циклу работы пневмоударника.

Таким образом, можно утверждать, что в настоящее время отсутствуют научно обоснованные и апробированные расчетные схемы и аналитические методы расчета трехмерных тел, близких по форме к конструкциям деталей машин для разрушения горных

пород, позволяющие решать комплекс практических задач обеспечения прочности и долговечности деталей погружных пневмоударников. Применяющиеся же инженерные методики расчета не позволяют учесть (частично или полностью) отражение волн деформаций от свободной поверхности деталей, отражение поперечных волн, изменение формы фронта волны, внутреннее трение, неравномерность в распределении напряжений по площадям сечений, особенности расходования ресурса при импульсном нерегулярном нагружении и ряд других факторов (табл. 1).

Определение основных направлений совершенствования проектных расчетов деталей связано в выяснением принципиальных особенностей их напряженно-деформированного состояния (НДС), возможности сведения динамической задачи к квазистатической, что определяется степенью влияния волновых явлений и процессов на формирование нестационарных полей напряжений и деформаций.

В литературе отсутствует единая точка зрения на диапазоны технических параметров, разделяющие условия формирования квазистатического и динамического НДС. Так, в [2] предлагается считать, что волновыми явлениями можно пренебречь, если продолжительность удара более, чем в 8 раз превышает наибольший период собственных колебаний соударяемых тел. В [3] в качестве условия квазистатического НДС принято, что продолжительность удара должна в несколько раз превышать время прохождения ударной волной удвоенной длины детали. Затруднение заключается в отсутствии надежных аналитических оценок продолжительности соударения и периода собственных колебаний трехмерных тел сложной формы. Таким образом, установление характера деформирования деталей пневмоударников оказывается основой как экспертной оценки адекватности результатов применяемых инженерных методов расчета, так и определения перспективных направлений их совершенствования.

Наибольший период собственных колебаний детали, вычисленный в ходе численного решения задачи о собственных частотах и формах собственных колебаний, и время ее прохождения ударной волной (табл. 1) полностью определяются конфигурацией детали и свойствами ее материала. Таким образом, эти параметры являются характеристиками детали и не зависят от внешних воздействий на нее.

Таблица 1. Геометрические и динамические характеристики деталей пневмоударников

Деталь	Длина по продольной оси, м	Время прохождения детали ударной волной, мкс	Наибольший период собственных колебаний, мкс
Коронка \varnothing 250 мм	0,275	55	28,70
Коронка \varnothing 220 мм № 1	0,290	58	27,66
Коронка \varnothing 220 мм № 2	0,290	58	28,70
Коронка \varnothing 180 мм	0,260	52	23,97
Коронка \varnothing 170 мм	0,210	42	18,41
Коронка \varnothing 160 мм	0,376	75	51,17
Коронка \varnothing 150 мм	0,310	62	28,79
Боек	0,430	86	50,81

Из анализа данных табл. 1 и приведенных выше условий формирования квазистатического НДС [2, 3] следует, что волновыми явлениями можно пренебречь при продолжительности соударения, превышающей для разных деталей значения в диапазоне 147-408 мкс.

В работе [4] приведены следующие значения продолжительности ударного импульса для пневмоударников: М-29Т – 145 мкс, МПЗ – 140 мкс, П-1-75 – 255 мкс, М-48 – 220 мкс. В этой же работе приводятся обобщенные данные по форме и продолжительности ударных импульсов, генерируемых в ударных системах различного типа: выносной (перфораторы) – 300 мкс и погружной (пневмоударники) – 144 мкс.

В работе [5] приводятся полученные экспериментально графики ударных импульсов в буровых ставах. В зависимости от типа соединения штанг (муфтовое, шпилечное) и других параметров ударной системы продолжительность импульса составляет от 200 до 700 мкс.

Таким образом, продолжительность ударного импульса колеблется в широком диапазоне, измеряется десятками и сотнями микросекунд, и сопоставима с установленными в диапазоне 147-408 мкс границами разделения квазистатического и нестационарного динамического НДС. Это не позволяет принять однозначное обоснованное решение о характере НДС деталей пневмоударников.

Для дополнительного изучения вопроса на этапе экспертизы системы проектных расчетов осуществлена серия вычислительных экспериментов по оценке параметров ударного импульса при соударении деталей пневмоударников и условий его распространения, отражения и затухания.

На первом этапе моделировалось соударение коронки и бойка реальных конфигураций (рис. 2). Полученная в результате моделирования осциллограмма интенсивности напряжений в зоне контакта бойка и коронки (рис. 3) представляет собой ударный импульс, продолжительность которого составляет примерно 620 мкс.

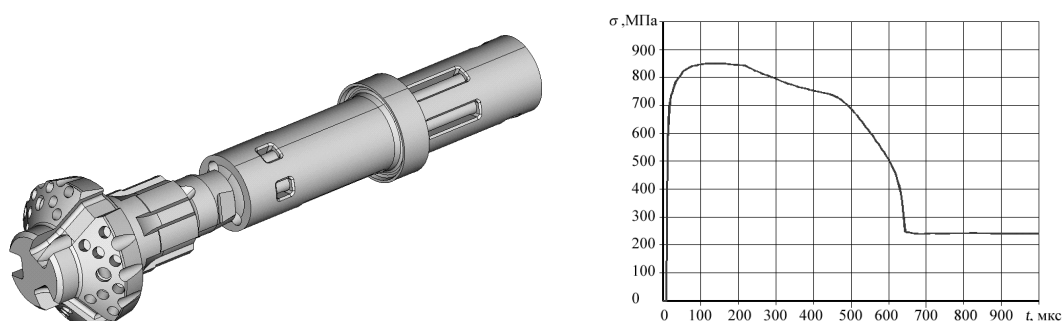


Рис. 2. Моделирование ударного взаимодействия бойка и коронки: *а* – твердотельные модели деталей; *б* – расчетный ударный импульс

На втором этапе решалась модельная задача импульсного нагружения стержня длиной 250 мм и диаметром 100 мм (приняты усредненные по группе деталей пневмоударников габаритные размеры) силой, приложенной к свободному торцу, противоположный торец стержня жестко закреплен. Импульс варьируемой продолжительности (от 40 до 800 мкс) имеет форму равнобедренного треугольника. В качестве результирующей величины рассматривалась расчетная осциллограмма интенсивности напряжений в непосредственной близости от нагружаемого ударным импульсом торца (рис. 3).

Интерпретация результатов выполнялась в предположении, что при наличии волновых процессов после импульсного нагружения стержня волна напряжений отразится от противоположного торца стержня и вернется к торцу, воспринявшему ударный импульс. Это выразится в появлении последовательности вторичных импульсов напряжений (вплоть до затухания колебаний стержня).

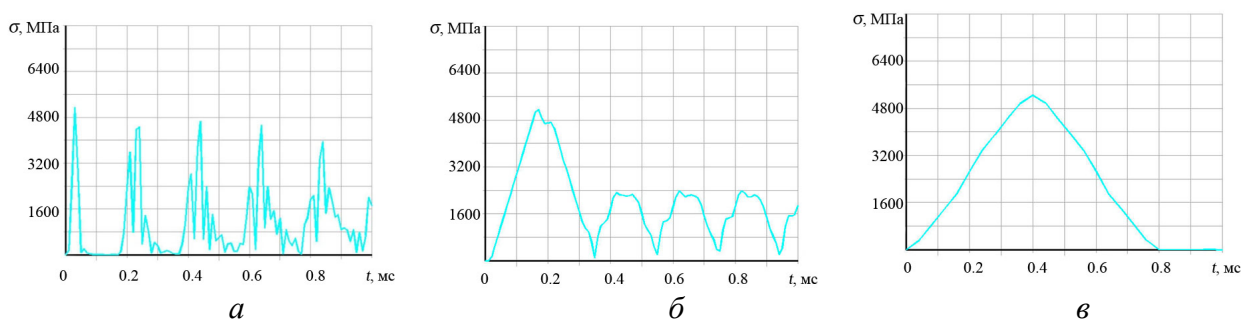


Рис. 3. Расчетная осциллограмма интенсивности напряжений при продолжительности ударного импульса 40 (*а*), 300 (*б*) и 800 (*в*) мкс

Рассмотрим с этих позиций осциллограмму на рис. 3, а. Отчетливо наблюдается импульс нагружения продолжительностью 40 мкс с наибольшим пиковым значением напряжений. Далее, через 180 мкс после начала действия ударного импульса наблюдается отраженный импульс – всплеск напряжений от отраженной волны с меньшим пиковым значением напряжений. Форма этого импульса отличается от формы приложенного ударного импульса, его длительность четко не устанавливается, ориентировочно составляет 120 мкс. Далее на осциллограмме можно наблюдать серию отраженных импульсов, имеющих тенденцию к постепенному уменьшению пиковых значений напряжений, уменьшению промежутков между импульсами и увеличению их продолжительности. Всего на промежутке времени 1000 мкс после начала действия ударного импульса наблюдается 4 отраженных импульса. Форма каждого последующего импульса все более отличается от формы приложенного ударного импульса. Все эти эффекты объясняются сложной картиной интерференции развивающейся во времени системы отраженных волн.

Аналогичную картину можно наблюдать на других осциллограммах, но по мере увеличения продолжительности первоначального ударного импульса постепенно уменьшаются пиковые значения напряжений отраженных импульсов, форма отраженного импульса становится все более простой (уменьшается проявление эффекта интерференции отраженных волн). При отсутствии однозначных общепринятых критериев по анализу внешнего вида осциллограмм напряжений может быть принято, что при длительности ударного импульса до 500 мкс учет волновых явлений обязателен, а при увеличении длительности ударного импульса свыше 500-600 мкс удовлетворительным является квазистатическое решение.

По совокупности полученных результатов можно сделать следующий вывод. Соотношение динамических характеристик деталей пневмоударников и параметров ударного импульса, формирующегося при их ударном взаимодействии, таково, что нестационарное НДС деталей можно считать пограничным, близким как к квазистатическому, так и к динамическому состоянию. Незначительные изменения конструктивных параметров деталей, условий их ударного взаимодействия могут привести к возникновению нестационарного НДС, в котором будут преобладать либо квазистатические, либо волновые процессы деформирования деталей. В связи с этим можно считать, что более адекватные результаты могут быть получены при учете волновых явлений, то есть, приемлемые аналитические решения следует искать преимущественно среди моделей волнового типа, а при численной оценке необходим анализ переходных процессов.

Список литературы

1. Блохин В.С. Динамическая напряженность коротких тел сложной формы. М.: Наука, 1991.
2. Батуев Г.С., Федосов А.А., Ефремов А.К. Соударение массивных тел при упругопластических деформациях в зоне контакта // Расчеты на прочность. Вып. 10. М.: Машиностроение, 1964. С. 363-369.
3. Дворников Л.Т., Жуков И.А. Продольный удар полукатеноидальным бойком. Новокузнецк: СибГИУ, 2006.
4. Александров Е.В., Флавицкий Ю.Ф., Хомяков К.С. Определение импульсов напряжений при продольном соударении упругих стержней произвольной геометрической формы. М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1965.
5. Казанцев А.А. Повышение эффективности передачи энергии ударных импульсов по ставу штанг при бурении скважин малых диаметров: автореф. дисс. канд. техн. Кемерово: КузГТУ, 2009.