

## Технические науки

### МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ ПРОЧНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БУРОВЫХ СТАНКОВ

**Гилёв А.В., Шигин А.О.,  
Доронин С.В., Гилёва Н.Н.**  
*ФГАОУ ВПО «Сибирский  
федеральный университет»,  
Красноярск, Россия*

Рассмотрим возможности классических аналитических подходов и перспективы применения современных численных методов анализа исследования напряженного состояния и расчета на прочность рабочих органов буровых станков. Необходимо отметить, что именно численные методы оказываются наиболее гибкими и приспособленными к постановке нетрадиционных задач, их решению и интерпретации. Основная задача инженера и исследователя в этом случае заключается в построении алгоритмов формообразования конструкций бурового органа на основе результатов этих решений.

#### Современное состояние численных методов исследования НДС

Под численными методами понимают приближенные способы и алгоритмы решения задач вычислительной математики и математической физики, аналитические подходы к которым оказываются чрезмерно сложными, громоздкими, трудоемкими, а то и совсем не разработанными. В настоящее время можно выделить три группы численных методов, позволяющих решать различные задачи моделирования сплошных сред: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ) (граничных интегральных уравнений). Несмотря на различие в подходах, эти методы объединяет единая математическая основа – методы и уравнения математической физики. Это стало возможным потому, что большие классы физических явлений описываются одинаковыми или весьма схожими математическими моделями и системами уравнений. Математические модели этих явлений, как правило, описываются при помощи дифференциальных уравнений с частными производными, называемых уравнениями математической физики.

Основные трудности при решении задач математической физики связаны с тем, что точно-

му решению существующими математическими методами поддаются лишь уравнения самого простого вида внутри геометрически тривиальных границ. Чтобы преодолеть эти трудности, необходимо преобразовать задачу к чисто алгебраической форме, включающей только основные арифметические операции. Для достижения этой цели могут быть использованы различные виды дискретизации непрерывной задачи, определенной дифференциальными уравнениями. При такой дискретизации бесконечное множество чисел, представляющих неизвестную функцию или функции, заменяется конечным числом неизвестных параметров, и для этого процесса требуется некоторая форма аппроксимации. Именно в этом и состоит основное различие между МКР, МКЭ и МГЭ.

**Метод конечных разностей (МКР)** успешно используется для решения задач теории упругости, теплопроводности и моделирования других процессов в сплошных средах. При этом трудности графической интерпретации исходных данных и результатов, большой объем работ по подготовке задачи к решению привели к тому, что МКР в инженерной практике и в научных исследованиях вытесняется МКЭ и МГЭ.

**Метод конечных элементов (МКЭ)** реализует альтернативный по отношению к МКР подход, состоящий в разбиении исследуемой области сплошной среды на ряд неперекрывающихся подобластей или элементов и построении затем аппроксимации кусочным образом, то есть отдельно для каждой подобласти. Появление этого метода обусловлено широким внедрением ЭВМ, и теперь наблюдается обратная картина: МКЭ способствует более интенсивному внедрению ЭВМ в инженерную и исследовательскую деятельность.

В настоящее время широко распространен ряд мощных коммерческих пакетов (ANSYS, NASTRAN, COSMOS...) и разработано большое число исследовательских программ. Наиболее интересными являются приложения МКЭ в области конструкционной прочности и механики разрушения.

**Метод граничных элементов (МГЭ)** является дальнейшим развитием идей аппроксимации и приближенного решения систем дифференциальных уравнений. Характерная особенность МГЭ – возможность решения задачи с использованием дискретизации лишь грани-

цы области. При этом предусматривается предварительный переход от исходной краевой задачи для дифференциальных уравнений к соотношениям, связывающим неизвестные функции на границе области. Существенным недостатком в области инженерных приложений является слабая визуализация, а также значительные в настоящее время ограничения на сложность формы исследуемой области.

#### **Численное моделирование НДС элементов конструкций**

В настоящее время накоплен значительный опыт конечно-элементного моделирования (МКЭ) крупногабаритных конструкций, в том числе крановых, экскаваторных, трубопроводных, аэрокосмических систем, а также сосудов давления, атомных реакторов и других технических систем. В зависимости от предъявляемых к конструкциям требований и постановки цели исследований используются различные по сложности задачи конечно-элементного моделирования. Для технических систем повышенной опасности, как правило, решаются комплексные задачи, направленные на недопущение крупных аварий, минимизацию риска и оптимизацию конструктивных схем.

Следует отметить, что моделирование аварийных ситуаций относится к наиболее сложным комплексным задачам. В некоторых случаях возникает необходимость моделировать весь процесс, начиная со взрыва, распространения акустических волн в атмосфере и по конструкции и кончая потерей способности конструкции. Несколько более простыми оказываются задачи оценки несущей способности элементов конструкций с накопленными в процессе эксплуатации повреждениями. Особую актуальность представляют задачи по непосредственному моделированию геометрии трещиноподобных дефектов элементов конструкций.

Рассмотренные результаты демонстрируют спектр возможных постановок задач и характеризуются тем, что большинство из них были получены в академических, учебных и отраслевых институтах и научно-исследовательских подразделениях наиболее передовых промышленных предприятий и организаций. Что касается ситуации на большинстве машиностроительных заводов, то для технических систем общего назначения обычно ограничиваются нестрогой минимизацией массы при рассмотрении нескольких альтернативных конструктивных вариантов.

Рассмотрение всего арсенала возможностей численных методов исследования НДС и

опыта их применения в инженерном проектировании позволяет сделать следующий вывод. В реальной инженерной практике, как правило, используется лишь незначительная часть возможностей математического, программного и аппаратного обеспечения задач механики деформируемого твердого тела и конструкционной прочности. В частности, все расчеты выполняются, как и в аналитической постановке, в предположении сплошности среды. При этом следует отметить, что крайне малочисленны исследования, посвященные непосредственному учету технологической и эксплуатационной дефектности при решении задач ресурсного проектирования.

Вместе с тем внедрение в инженерную практику статического анализа НДС позволяет резко повысить качество и технический уровень изделий машиностроения.

Что касается конструкций буровых органов, в литературе не удалось обнаружить примеров и описаний результатов численного решения задач оценки напряженного состояния этого класса конструкций. Рассмотрим возможные постановки и решения задач исследования НДС конструкций бурового оборудования.

#### **Постановка и конечно-элементные технологии решения современных задач прочностных расчетов рабочих органов буровых станков**

Современное состояние численных методов анализа напряженного и деформированного состояния, наличие мощных пакетов конечно-элементного анализа и высокопроизводительных средств вычислительной техники открывает перспективы как решения традиционных задач проектирования бурового инструмента на более высоком качественном уровне, так и постановки новых задач, которые не могли быть решены на старой технической и методической базе. Рассмотрим ряд задач, решение которых связано с использованием информации о распределении полей напряжений и деформаций в элементах бурового инструмента.

1. Оценка напряженного и деформированного состояния при статическом приложении комплекса рабочих нагрузок. При этом возможно и необходимо проведение серии вычислительных экспериментов с варьированием в широких пределах формы, размеров инструмента и вооружения, условий закрепления и приложения нагрузки. На этом этапе возможно рассмотрение всех мыслимых расчетных случаев и выявление нежелательных комбинаций нагрузок и условий опирания.

2. Оптимизация формы и размеров бурового инструмента и вооружения. Здесь возможна практически строгая постановка задачи оптимизации, что невозможно для подавляющего большинства изделий машиностроения при использовании аналитических методов решения. Наибольший научный и практический интерес представляет формулировка новых критериев оптимизации, которые применительно к породоразрушающему вообще и к буровому инструменту в частности должны отражать связь напряженного состояния элементов вооружения и эффективности разрушения породы в забое.

3. Оценка свойств бурового инструмента как аккумулятора упругой энергии. Идея о связи процессов разрушения с уровнем накопленной упругой энергии развита в трудах Я.Б.Фридмана. Эта связь применительно к процессам взаимодействия бурового инструмента и породы может быть представлена следующим образом. Постоянное осевое усилие, развиваемое приводом бурового станка, передается через буровой став на инструмент и далее на породу. При этом деформируются все элементы става и инструмента, накапливая в себе упругую энергию деформирования. Количественная оценка этой энергии представляет собой сумму произведений напряжений на деформации по всем элементарным объемам деформируемой конструкции. При первоначальном внедрении инструмента в породу инструмент деформируется и накапливает в себе энергию до тех пор, пока не начнется разрушение породы. Воздействие на забой суммируется из двух составляющих – осевого усилия подачи и выделяющейся накопленной упругой энергии. Можно сделать предположение, что чем больше упругой энергии в состоянии накопить буровой инструмент, тем в большей степени он в состоянии преодолевать твердые включения и тем лучше приспособлен для бурения пород с резко неоднородными свойствами.

4. Анализ упругопластического поведения материала бурового инструмента. При перегрузках и контактном взаимодействии породы с буровым инструментом в корпусе и элементах вооружения последнего возможно возникновение зон и объемов пластической деформации. В этих местах нарушаются формы поверхностей породоразрушающих элементов, что, как правило, снижает эффективность бурения. В связи с этим одним из показателей качества инструмента можно считать отсутствие либо минимальное количество пластически деформированного материала.

5. Оценка напряженного и деформированного состояния при динамическом внедрении

инструмента в забой. Здесь интерес представляют три момента. Во-первых, уровень напряжений и деформаций непосредственно в буровом инструменте. Во-вторых, анализ распространения возникшей в инструменте волны деформации, влияния ее на поведения бурового става и станка. В-третьих, влияние ударной нагрузки на забой скважины, величина и характер возникающей при ударе инструмента зоны предразрушения.

6. Анализ взаимодействия бурового инструмента и породы. Здесь речь идет о взаимодействии конструктивно не связанных элементов, при взаимодействии которых первоначально возникает площадка контакта, затем, возможно, внедрение одного тела в другое. Кроме того, возможен анализ процессов при трении породы об разные элементы инструмента и вооружения. Задачи такого типа называются контактными. Применительно к буровому инструменту наиболее близкими по постановке оказывается ряд решенных разными исследователями экспериментальных задач по вдавливанию штампа или инденторов различных форм и размеров в породу.

---

НИР выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

## **НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АВТОРЕЗОНАНСНОЙ ОБРАБОТКЕ**

**Крупенин В.Л.**

*ИМАШ РАН, Москва, Россия*

Среди различных способов обработки металлических заготовок, выделяются ультразвуковые способы. При их посредстве производят, например, точение металлов, а также выглаживание их поверхностей [1]. Было показано, что одним из наиболее эффективных методов воздействия оказывается организация системы в соответствии с так называемыми авторезонансными принципами. Авторезонанс – суть резонанс под действием сил, порождаемых движением самой системы. При установлении авторезонансных режимов движения системы работает с максимальной эффективностью. Обычная настройка инструмента в режиме холостого хода заменяется организацией эффективной настройки, вибрирующего инструмента, который выбирает резонансные состояния с учетом изменившихся внешних воздействий. Таких как усилие прижима инструмента, влияние на ин-