

## О Т З Ы В

официального оппонента, д.т.н., профессора **Саммалья Андрея Сергеевича** на диссертацию **Катерова Андрея Максимовича** на тему: «**Геомеханическое обоснование параметров крепи глубоких стволов при освоении калийных месторождений в сложных горно-геологических условиях**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

### 1. Актуальность темы диссертации

Вертикальные стволы шахт и рудников являются сложными и дорогостоящими капитальными подземными сооружениями, к крепи которых предъявляются самые высокие требования долговечности в связи с тем, что они должны обеспечить безаварийное функционирование горного предприятия в течение всего срока эксплуатации. При этом для стволов калийных рудников требования надежности еще более ужесточаются, поскольку аварии, связанные с разрушением крепи могут приводить к прорывам подземных вод в рудное тело, последствия которых, как правило, приобретает масштабы техногенных катастроф.

В настоящее время на территории Российской Федерации началась эксплуатация нового Гремяченского калийного рудника и ведется активная подготовка к освоению еще одного Нивенского месторождения. Главной особенностью новых месторождений является большая глубина залегания разрабатываемых пластов руды, которая превышает 1000 м. Таким образом, сооружаемые для вскрытия рудных залежей вертикальные стволы должны быть пройдены в мощных слоях соляных пород, расположенных на столь значительной глубине. В связи с этим накопленный в нашей стране опыт строительства глубоких вертикальных стволов, а также имеющаяся нормативно-техническая база проектирования и расчета крепи должны быть скорректированы применительно к новым специфическим горно-техническим условиям проходки и эксплуатации таких сооружений. Основная проблема заключается в том, что соляные породы обладают выраженной склонностью к проявлению ползучести. При этом, как известно, с увеличением глубины, ростом напряженного состояния и

ОТЗЫВ

ВХ. № 9-186 от 04.09.23  
АУ УС

повышением температурного фона в массиве интенсивность реологических процессов в каменных солях нарастает. Следствием процесса ползучести является существенное увеличение объемных деформаций массива в приконтурной зоне стволов, и нарастание во времени нагрузок на крепь, которые теоретически должны достигать бытового поля напряжений на заданной глубине, равного полному весу столба вышележащих пород. Очевидно, что на глубинах, превышающих 1000 м, величина горного давления в таких условиях будет столь значительной, что ни одно из традиционных конструктивных решений крепи ствола не сможет обеспечить требуемую несущую способность.

В связи с этим возникает необходимость в проведении широкого спектра новых научных исследований, связанных с изучением различных аспектов взаимодействия элементов единой геомеханической системы «массив солей – крепь ствола» на больших глубинах. Таким образом, тема диссертации Катерова А. М., посвященная обоснованию параметров крепи глубоких стволов при освоении калийных месторождений в сложных горно-геологических условиях, является актуальной, а рассмотренные в работе задачи и полученные автором результаты представляют научный и практический интерес.

## **2. Научная новизна диссертации**

Современные компьютерные программные комплексы реализующие, в основном, метод конечных элементов, открывают новые возможности для использования наиболее адекватных физических моделей и пространственных расчетных схем, что является особенно актуальным при моделировании сложных процессов деформирования соляных пород, вмещающих вертикальные стволы.

Новизна выполненного Катеровым А. М. диссертационного исследования состоит в том, что автором ставится и решается ряд актуальных научных и технических задач, связанных с оценкой влияния реологических процессов в пластах каменной соли, расположенных на больших глубинах, с учетом повышенного температурного фона, и особенностей поведения в таких сложных условиях комбинированных конструкций крепи стволов, включающих чугунные тубинги, бетонное заполнение и податливый слой из сильнодеформируемого материала. При этом следует особо отметить, что выполненные автором исследования базируются на реализации оригинальных геомеханических моделей с применением сложных конечно-элементных программных

комплексов, с помощью которых удается реализовать объемную постановку рассматриваемых задач.

В целом, можно выделить следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

- сформулированные автором рекомендации по настройке параметров реализуемых современными компьютерными программными комплексами геомеханических моделей поведения соляных пород в условиях полей высоких напряжений и температур,
- предложенные принципы построения объемных численных моделей компьютерного прогноза напряженно-деформированного состояния системы “крепь глубокого вертикального ствола – соляной породный массив”, включая переходные зоны контакта двух породных слоев с различными деформационными характеристиками.
- уточненные закономерности развития напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных стволов во времени в зависимости от параметров принятой конструкции крепи и горно-геологических условий строительства;
- новые результаты компьютерного моделирования чугунной тюбинговой крепи стволов с учетом объемной геометрической конфигурации тюбингов и обосновано введение корректирующих коэффициентов для уточнения расчетных напряжений, получаемых с применением расчетных схем, в которых крепь моделируется многослойной системой, состоящей из квазиоднородных слоев;
- прогнозная оценка работоспособности комбинированной крепи стволов из чугунных тюбингов с бетонным заполнением и податливым слоем применительно к глубоким соляным рудникам.

Новизна полученных автором результатов сомнений не вызывает.

### **3. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций**

Большое внимание в работе уделено обоснованию сформулированных научных положений. Так, в ходе выполненных исследований автор обработал и проанализировал большой объем накопленных данных лабораторных испытаний материалов крепи и кернов солей из глубоких пластов. В результате были установлены конкретные

параметры принятой с целью описания деформирования массива солей геомеханической модели Double Power Law, которая может быть стандартным образом реализована в применяемом компьютерном программном обеспечении расчета подземных конструкций. Далее выполнено сравнение получаемых расчетных величин смещений массива применительно к реальным условиям строительства стволов с данными натурных исследований, опубликованными зарубежными специалистами. Удовлетворительное согласование расчетных и измеренных значений нагрузок на крепь позволило автору сделать вывод об обоснованности сформулированных выводов и рекомендаций, а также о достоверности получаемых в результате компьютерного моделирования результатов.

**Первое научное положение**, согласно которому минимальный размер численной модели должен соответствовать не менее 17 эквивалентным радиусам поперечного сечения исследуемого вертикального ствола сомнений не вызывает. Этот вывод был основан на результатах большого объема исследований, выполненных во второй главе диссертации. Анализ полученных данных позволил автору убедительно показать, что только задание столь значительного размера численной модели позволяет корректно спрогнозировать реализуемые за длительный срок смещения породных обнажений на основе применения реологической модели Double Power Law.

**Второе научное положение** диссертации, обосновывающее методику выбора параметров численной модели для оценки напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола, пройденного в соляных породах на больших глубинах, также представляется достаточно обоснованным. Основываясь на результатах выполненных исследований автор предложил введение уточняющих коэффициентов, позволяющих повысить точность определения параметров крепи, учитывая развитие деформаций в рассматриваемый промежуток времени. Подтверждению достоверности данного положения посвящена третья глава диссертационной работы.

Достоверность **третьего научного положения**, в котором указывается на необходимость учета переходных зон в окрестности контакта двух породных слоев, один из которых представлен прочными породами, а второй - солями, склонными к проявлению больших деформаций во времени, сомнений также не вызывает. Размеры таких участков принимались на основе анализа типового строения массива Нивенского месторождений калийных руд. В результате автором сделан вывод о том, что практическое использование сформулированных в диссертации рекомендаций

позволяют повысить достоверность прогноза изменения напряженно-деформированном состоянии крепи ствола во времени. Обоснованию третьего научного положения посвящены третья и четвертая главы работы.

В целом, можно отметить, что все научные положения, а также сформулированные на их основе выводы и рекомендации представляются достаточно основательно проработанными и полностью раскрытыми.

#### **4. Научные результаты, их ценность**

Можно выделить следующие научные результаты, полученные в диссертационной работе Катерова А.М., представляющие несомненную ценность:

- разработанная численная модель прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива системы “крепь вертикального ствола – породный массив” в объемной постановке;
- уточненные параметры модели и усовершенствованная методика расчета крепей глубоких вертикальных стволов в соляных породах.

Ценность указанных научных результатов заключается в том, что они обладают новизной и создают предпосылки для совершенствования теоретического подхода к расчету крепи вертикальных стволов, пройденных в мощных слоях соляных пород, расположенных на больших глубинах.

Тематика и содержание публикаций Катерова А.М. в полной мере отражают научные результаты и содержание диссертационной работы. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 1 статье в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в рецензируемых изданиях, входящих в базы данных и систему цитирования РИНЦ; получен 1 патент.

#### **5. Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации**

Теоретическая значимость работы заключается в совершенствовании научных подходов с целью обоснования применения новых геомеханических моделей,

применительно к расчету многослойной комбинированной крепи из чугунных тубингов в сочетании с бетонным заполнением и слоем из податливого материала глубоких вертикальных стволов, пройденных в сложных горно-геологических условиях калийных месторождений, характеризующихся большими глубинами.

К практической значимости полученных результатов следует отнести сформулированные в работе рекомендации по применению разработанной численной модели прогноза напряженно-деформированного состояния системы “крепь вертикального ствола –массив солей” с целью оценки параметров конструкции крепи, обеспечивающих достаточную несущую способность на протяжении всего срока службы ствола.

## **6. Рекомендации по использованию результатов работы**

Полученные в диссертации Катерова А.М. результаты, расширяющие геомеханические представления об особенностях взаимодействия сложной комбинированной конструкции крепи ствола с вмещающим массивом каменной соли на больших глубинах, содержат научную новизну и позволяют повысить уровень надежности принимаемых проектных решений. Сформулированные в работе выводы и рекомендации представляют интерес для специалистов - шахтостроителей и могут быть использованы в работах научно-исследовательских и проектных организаций при решении вопросов крепления стволов, сооружаемых в соляных породах на большой глубине. Высокий научный уровень выполненных теоретических исследований является основанием для их включения в соответствующие учебные курсы с целью последующего изучения студентами горных специальностей ВУЗов РФ.

## **7. Замечания и вопросы по работе**

Высоко оценивая научный уровень выполненных исследований, тем не менее, по тексту работы можно сделать ряд замечаний.

1. При проведении исследований, связанных с изучением влияния различных факторов, на этапе построения конечно-элементных моделей автору следовало ограничивать рассматриваемые диапазоны изменения анализируемых параметров в рамках реально

возможных значений. Так, при изучении влияния температурных режимов на интенсивность развития реологических процессов в каменных солях рассмотрение температур в диапазоне изменения от 373К до 523 К (что соответствует интервалу 100 – 253<sup>0</sup> С) представляется совершенно излишним. Автору достаточно было рассмотреть значения температур, изменяющихся, например, в пределах от 273 К до 310 К и формулировать выводы исходя из этих условий. Аналогичное замечание можно сделать относительно настройки параметров конечно – элементной модели, описывающих деформирование чугуна ВЧ-50. Поскольку в рамках решений рассмотренных задач получение расчетных растягивающих напряжений в чугунных тубингах крепи исключено, а возможные уровни сжимающих напряжений, которые допускаются при проектировании таких конструкций, не должны превышать 400 МПа, представляется, что автору следовало ограничиться изучением диапазона сжимающих напряжений в пределах 0 - 400 МПа. При этом следует отметить, что настройка весьма сложных расчетных моделей, подобных использованным в диссертации, на чрезмерно широкий диапазон изменения влияющих факторов может вместо уточнений, наоборот, вносить дополнительные погрешности в расчет. В этой связи сделанный в работе вывод о необходимости учета при расчете крепи стволов пластического деформирования чугуна (в условиях, когда уровни деформаций не превышают 0,005%) требует более глубокого осмысления.

2. При описании конечно-элементной модели (рис. 3.6), применяемой с целью сравнения различных методик прогноза напряженно-деформированного состояния комбинированной тубинговой крепи стволов, автору следовало более подробно раскрыть, каким образом загружалась модель, чтобы в ней было реализовано однородное поле начальных напряжений  $\sigma_x = \sigma_y = \gamma H$ . При этом восприятие этого важного раздела исследований значительно улучшилось, если бы автор также привел результаты анализа основных факторов, которыми обусловлены отличия в результатах, получаемых при расчете протяженного объекта на основе 3D моделирования и с использованием решения соответствующей плоской задачи (в условиях плоской деформации).

3. К достоинствам применяемого компьютерного обеспечения можно отнести принципиальную возможность детализировать расчетную модель комбинированной крепи из чугунных тубингов в сочетании с бетонным заполнением и податливым слоем, прорисовывая каждый элемент конструкции. При этом в тексте диссертации следовало

более широко представить результаты моделирования и проиллюстрировать возможности, которые открывает принятая высокая степень детализации конструкции тюбингов при расчете и проектировании крепи.

4. В четвертой главе диссертации автор приводит результаты многовариантного компьютерного моделирования комбинированной тюбинговой крепи ствола применительно к реальным горно-геологическим условиям Нивенского месторождения калийных руд. При этом основное внимание уделено оценке влияния создаваемого податливого слоя, при формировании нагрузок на крепь ствола. Как следует из текста работы, автор предлагает устанавливать толщину указанного слоя такой, чтобы была обеспечена возможность его деформирования в течение всего периода эксплуатации рудника, например, 50 лет. В связи с этим в диссертации следовало прояснить, из каких соображений применяются столь мощные и дорогостоящие тюбинги из высокопрочного чугуна ВЧ 50 и ВЧ 70, если согласно рис. 4.15 максимальные расчетные напряжения в них не должны превышать 50 МПа.

5. С сожалением следует отметить, что в тексте диссертации встречаются многочисленные стилистические погрешности, которые, впрочем, не являются критическими для ее восприятия. Указанные погрешности, скорее всего, являются следствием многократных редакторских правок и переработок текста рукописи.

В целом, сделанные замечания в значительной степени имеют характер рекомендаций и призваны сориентировать диссертанта при выполнении дальнейших исследований в рамках рассматриваемой проблемы.

## **8. Заключение по диссертации**

Представленная на отзыв диссертация Катерова Андрея Максимовича является законченной научно-квалификационной работой, в которой предложен новый подход к решению актуальной научной и технической задачи геомеханики, связанной с теоретическим обоснованием на основе компьютерного моделирования параметров комбинированной многослойной крепи глубоких стволов, сооружаемых в соляных породах, что имеет важное значение для развития горного производства в Российской Федерации.



