взрывчатого вещества испытанного макета. Подобные работы были проведены на этом же полигоне сотрудниками ВНИИЭФ.

Один из основных принципов проведения неядерно-взрывных экспериментов на Новоземельском полигоне – это неукоснительное соблюдение требований экологической безопасности.

Экологическую безопасность таких экспериментов всегда обеспечивало, в том числе, грамотное проектирование, требующее большого профессионализма.

Начиная с 1998 г. в ядерных центрах были начаты работы по созданию нового объекта – Штольни-лаборатории (ШЛ) на базе штрека многоразового использования.

В 2006 г. на Новоземельский полигон вместе с сотрудниками ядерных центров была направлена группа авторского надзора в составе проектировщиков института «ВНИПИпромтехнологии», непосредственных разработчиков проектной документации по объекту. В их обязанности входили контроль за выполнением подготовительных работ по технологическому обустройству лабораторных помещений ШЛ, оценка их соответствия проекту. По окончании всех работ по созданию ШЛ и приемки экспертной комиссией объект Штольня-лаборатория был введен в эксплуатацию.

Штольня-лаборатория представляет собой единый комплекс подземных и наземных сооружений, предназначенных для проведения НВЭ. Комплекс оснащен системами жизнеобеспечения (освещение, электроснабжение, вентиляция и т. д.), объектами многоразового использования, кабельными линиями, связью, рядом защитных сооружений и т. д. В результате выполненных работ достигнут высокий уровень надежности и безопасности проведения неядерно-взрывных экспериментов на полигоне, который удовлетворяет требованиям МАГАТЭ по обеспечению радиационной безопасности. Эксплуатация стационарного комплекса позволила сэкономить значительные денежные средства.

Заключение

Создав такой стационарный комплекс, который является научно-техническим достижением мирового уровня, наша страна на два года опередила США в этой области. И немалая заслуга в этом принадлежит проектировщикам института «ВНИПИпромтехнологии», которые участвовали в создании этого проекта.

В трудных суровых природных условиях работы на Новоземельском полигоне в полной мере проявились лучшие качества участников работ – высокое чувство ответственности за порученное дело, гордость за причастность к решению проблем, связанных с обеспечением безопасности страны. ГЖ

УДК 622.841

ПРОГНОЗ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДРАБОТКЕ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

К. Н. ТРУБЕЦКОЙ,
член Президиума РАН, академик РАН

Н. А. МИЛЕТЕНКО,
старший научный сотрудник, канд. техн. наук,
nmilet@mail.ru

Институт проблем комплексного освоения недр
им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

Оценено взаимодействие гидрогеологических и геомеханических процессов при подработке водных объектов в сложных горно-геологических условиях. Утверждается, что прогноз влияния этих процессов может осуществляться на основе дополняющих друг друга деформационного подхода и исследований на основе теории трещин.

Ключевые слова: *геомеханические процессы, напряженное состояние, водопроводящие трещины, деформационный подход, компьютерное моделирование, рекультивация.*

DOI: *10.17580/gzh.2021.03.02*

Введение

При добыче полезных ископаемых в зону влияния горных работ часто попадает большое число объектов, составляющих важные ресурсы горнодобывающих регионов. К этим ресурсам относятся реки, пахотные земли, инженерные сооружения, городские постройки, коммуникации, другие природные и искусственные объекты. Недостаточно обоснованная разработка месторождения нередко ведет к негативным экологическим и социальным последствиям, а также к убыткам, сопоставимым с экономической выгодой от разработки [1–7].

Вместе с тем разработка полезных ископаемых часто связана с негативным воздействием наземных и подземных вод на безопасность и технологию добычи [8–10]. К настоящему времени разработаны методики прогноза изменения гидрогеологической

© Трубецкой К. Н., Милетенко Н. А., 2021

обстановки при разработке месторождений, определения техногенного режима движения подземных вод, формирования системы мониторинга за гидрогеологическими процессами и предупреждения вредных и опасных последствий этих процессов [11, 12].

Несмотря на успехи в борьбе с проявлениями гидрогеологических и геомеханических процессов, актуальные проблемы предотвращения их негативного техногенного воздействия на природную среду и сохранения земных недр все еще не решены. В связи с этим ощущается необходимость в разработке новых подходов и методов исследований, в том числе на основе современных достижений из других научных дисциплин в области наук о Земле, физики, материаловедения, математики [13–19].

В горнопромышленной гидрогеологии, основная цель которой состоит в изучении водопритока в горные выработки, традиционные представления о фильтрационных потоках [19, 20] рассматривают в совокупности с особенностями дренируемых горизонтов, условий их питания, геометрии подземных горных выработок и технологии добычи. Важной особенностью горнопромышленной гидрогеологии является учет фактора техногенных водопроводящих трещин [21–23]. При горных работах в массиве могут формироваться зоны водопроводящих трещин, которые служат легкопроходимыми каналами для проникновения в горные выработки не только подземных вод вышележащих водоносных пластов, но часто и поверхностных вод.

Образование наведенных водопроводящих трещин кардинально изменяет гидрогеологическую обстановку в районе добычи, поскольку эти трещины не только представляют опасность в связи с затоплением выработок, но также могут служить каналами для миграции природных минерализованных шахтных вод на горизонты питьевой воды, тем самым предопределяя необратимое загрязнение воды. Образование водопроводящих трещин, как правило, переводит контролируемую гидрогеологическую обстановку в режим неконтролируемой.

Таким образом, для более адекватного прогноза гидрогеологической обстановки при добыче твердых полезных ископаемых и предотвращения опасных последствий необходимо рассматривать гидрогеодинамические процессы не только в совокупности с деформационными процессами, происходящими в массиве горных пород, но и с многоаспектными процессами разрушения массива пород. В настоящей работе взаимодействие гидрогеологических, деформационных процессов и процессов разрушения рассматривается в связи с подработкой водных объектов на поверхности.

Разработка деформационного подхода к прогнозу взаимодействия геомеханических и гидрогеологических процессов

Одно из направлений современных исследований на стыке гидрогеологии и геомеханики связано с разработкой инженерных методов прогноза взаимодействия гидрогеологических и деформационных процессов [2, 3]. На основании инструментальных натурных исследований и опыта ведения горных работ вблизи водных объектов установлено, что в подработанной толще среди других можно выделить шесть зон: обрушенной породы *1*; сквозных трещин *2*; частично сквозных трещин *3*; отдельных трещин, не образующих единую систему *4*; без разрывов сплошности *5*; повышенных напряжений и деформаций сжатия *6* (**рис. 1**).

При попадании водного объекта в зоны *1* и *2* происходит прорыв воды с полным затоплением горных выработок. Если водный объект попадает в зону *3*, то наблюдается интенсивное увеличение притока воды в горные выработки. В случае попадания водного объекта в зону *4* существенное возрастание притока воды в горные выработки не происходит. Из водных объектов, расположенных в зонах *5* и *6* вода в горные выработки не поступает.

Таким образом, при реализации деформационного подхода задача прогноза сводится к определению местоположения указанных выше зон в различных горно-геологических условиях разработки пластов, причем практический интерес представляют в основном зоны *3* и *4*. Анализ результатов натурных наблюдений и аналитические расчеты показывают, что расстояние по нормали от кровли разрабатываемого пласта до границ каждой из перечисленных зон можно определить по следующим выражениям:

$$H_4 = c_4 m/\varepsilon_{п.р}\Delta K_\alpha;\ H_3 = c_3 m/\varepsilon_{п.р}\Delta K_\alpha;\ H_2 = c_2 m/\varepsilon_{п.с}\Delta K_\alpha,$$

где H_4, H_3, H_2 – расстояния по нормали до границ зон; c_4, c_3, c_2 – коэффициенты, учитывающие зависимость горизонтальных деформаций слоев в различных зонах от отношения H/m, определяемые опытным путем. Инструментальные наблюдения в угольных бассейнах страны показали, что значения c_4 для слоев, прилегающих к земной поверхности, колеблются от 0,6 до 0,8, $c_3 = 0{,}4 \div 0{,}5$, $c_2 = 0{,}2 \div 0{,}3$. Для слоев, расположенных в массиве горных пород и работающих подобно плитам, защемленным по концам, значения коэффициентов составляют $c_4 = 0{,}35 \div 0{,}45$; $c_3 = 0{,}2 \div 0{,}3$; $c_2 = 0{,}1 \div 0{,}2$; m – вынимаемая мощность пласта; $\varepsilon_{п.р}$ – предельные деформации растяжения, при которых горные породы теряют сплошность; $\varepsilon_{п.с}$ – предельные деформации сжатия, при которых происходит разрушение горных пород; ΔK_α – поправочный коэффициент, учитывающий влияние угла падения пород α на развитие деформаций толщи: $\Delta K_\alpha = 0{,}75/(0{,}75 \div 0{,}16\alpha/\rho)$; $\rho = 57°$.

Подставив значения предельных деформаций растяжения, при которых горные породы начинают терять первоначальную сплошность (для глинистых сланцев $\varepsilon_{п.р} = 0{,}006 \div 0{,}008$, для песчаников и конгломератов $\varepsilon_{п.р} = 0{,}003 \div 0{,}004$, для угля $\varepsilon_{п.р} = 0{,}002 \div 0{,}003$, предельные деформации сжатия, при которых начинают разрушаться глинистые сланцы, песчаники и алевролиты, находящиеся в условиях объемного сжатия $\varepsilon_{п.с} = 0{,}010 \div 0{,}012$) и значения коэффициентов c, можно получить значения расстояний от кровли пласта до соответствующих границ зон. При средних значениях коэффициентов c граница между зонами *4* и *5* в толще пород, сложенной песчаниками, должна находиться на расстоянии $(100 \div 300)m$ от кровли разрабатываемого пласта, а представленной глинистыми сланцами – на расстоянии $(50 \div 65)m$. При тех же условиях граница между зонами *3* и *4* в песчаниках будет располагаться на расстоянии $(60 \div 80)m$, а в глинистых сланцах – на расстоянии $(30 \div 40)m$ и граница между зонами *2* и *3* – на расстоянии $(10 \div 15)m$.

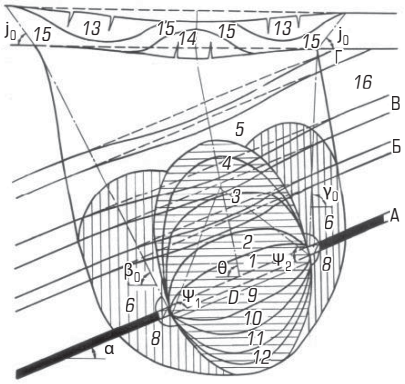

Рис. 1. Зоны в подработанном массиве (М. А. Иофис [3])

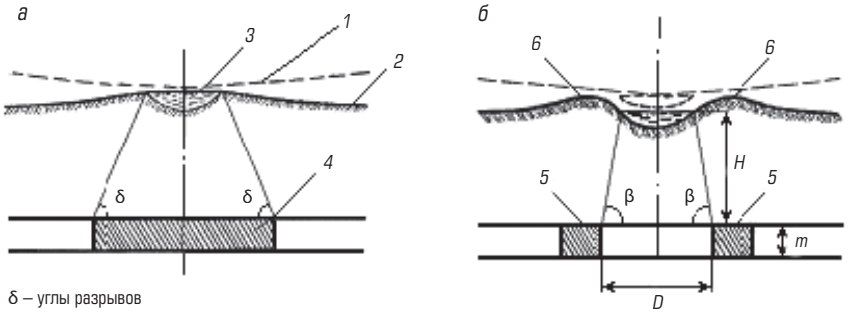

Рис. 2. Предохранительный целик под водным объектом (*а*) и изменение гидро- и геомеханических условий при частичной разработке целика (*б*):
1 – поверхность земли до отработки; *2* – поверхность земли после отработки; *3* – водный объект; *4* – предохранительный целик; *5* – барьерный целик; *6* – водозащитные валы-дамбы

Разработанный аппарат прогноза взаимовлияния гидрогеологических и геомеханических процессов был успешно апробирован на угольных месторождениях Донбасса.

В качестве другого примера применения деформационного подхода рассмотрим разработку пласта полезного ископаемого под рекой. При подземной разработке полезных ископаемых вблизи рек последние нередко оказываются выше остальной местности, осевшей под влиянием горных работ. Естественный сток воды в реку прекращается, а сама местность заболачивается. Для предотвращения затопления прибрежной местности необходимо строить дамбы. В самих целиках остается полезное ископаемое, которое уходит в безвозвратные потери.

С целью рекультивации прибрежных площадей и снижения потерь полезных ископаемых в целиках предложено в предохранительном целике осуществлять выемку полезного ископаемого слоями шириной не менее ширины зеркала воды водоема, оставляя по бокам барьерные целики (**рис. 2**).

Ширину лавы D необходимо выбирать в зависимости от мощности вынимаемого пласта, чтобы в толще пород после отработки лавы и оседания породы в зоне сжатия не образовывались водопроводящие трещины, соединяющие водоем с горными выработками. В результате указанных мероприятий над барьерными целиками на поверхности земли естественным образом образуются водозащитные валы-дамбы, а сам водный объект опускается ниже положительных отметок прибрежной зоны поверхности земли.

В результате инженерных расчетов с учетом экспериментальных данных установлено, что параметр D необходимо определять по формуле: $D = d + 2H\mathrm{ctg}\beta$, где D – ширина лавы; d – ширина водного объекта; H – глубина горных работ; β – угол, определяющий положение зоны сжатия на земной поверхности.

Таким образом, деформируя земную поверхность при отработке предохранительных целиков с оставлением барьерных целиков, опускают урез водного объекта ниже положительных отметок прибрежной зоны. При такой естественной рекультивации ландшафта, заключающейся в выравнивании положительных форм рельефа, отпадает необходимость в завозе грунта, поскольку плодородный слой земли сохраняется.

Моделирование развития водопроводящих трещин в подработанном массиве пород

Помимо инженерных методов для изучения взаимодействия геомеханических и гидрогеологических процессов при подработке массива горных пород, разрабатывают методы математического моделирования. Эти методы, ориентированные на использование современных компьютерных программ, позволяют использовать разработки из других научных дисциплин и могут служить основой для междисциплинарных исследований. В частности, в данных исследованиях использована математическая модель теории трещин и теории фильтрации.

Результаты компьютерного моделирования, подтвержденные натурными данными, показали, что в подработанном массиве пород возможно развитие трещин самопроизвольного гидроразрыва, которые могут являться магистральными каналами для проникновения подземных и поверхностных вод в горные выработки. Природа самопроизвольного гидроразрыва пород связана с тем, что при техногенном перераспределении напряжений в массиве пород одно из главных напряжений может принять значение, меньшее гидростатического давления воды. В этом случае происходит развитие трещины гидроразрыва пород в той области массива, где это условие выполняется. Трещина гидроразрыва, в свою очередь, изменяет напряженное состояние массива. Возможность развития трещины гидроразрыва определяется в результате нелинейного взаимодействия двух факторов – техногенного перераспределения напряжений и гидростатического давления воды на массив пород.

В качестве примера рассмотрен прорыв воды из поверхностного водоема в подземную выработку. Этот пример в определенной степени соответствует ситуации, изображенной на рис. 2, *б*. Как во многих теоретических исследованиях, схему задачи принимали упрощенной. Считали, что выполняются условия плоской деформации, а выработка представляется прямоугольником.

В рассмотренном примере выработка расположена на глубине 300 м от земной поверхности. Природное поле напряжений определяли по гипотезе акад. А. Н. Динника, согласно которой давление налегающей толщи задают весом пород, а боковое давление определяют по формуле: $\sigma_\Gamma \le \nu\gamma H/(1 - \nu)$, где ν – коэффициент

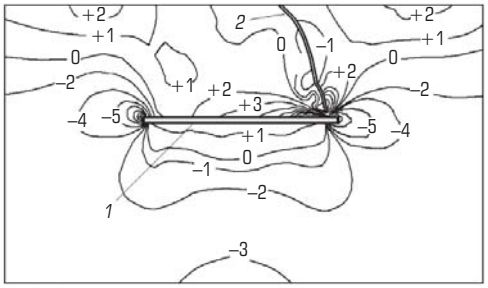

Рис. 3. Траектория развития трещины и эпюры наименьшего главного напряжения в массиве пород (значения в МПа, напряжения растяжения положительны):
1 – выработка; *2* – трещина гидроразрыва пород

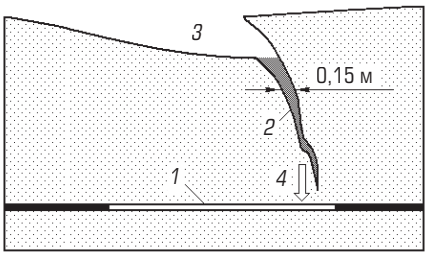

Рис. 4. Схема расхождения берегов трещины самопроизвольного гидроразрыва:
1 – лава; *2* – трещина гидроразрыва пород; *3* – водный объект на поверхности; *4* – место прорыва воды в выработку

Пуассона; γ – усредненный удельный вес пород налегающей толщи; *H* – расстояние от выработки до земной поверхности. Усредненный модуль деформации массива налегающих пород принимали равным 1000 МПа, коэффициент Пуассона 0,23, усредненную плотность пород 2,5 т/м^3.

Математическая модель развития трещины самопроизвольного гидроразрыва изложена в [24]. Возможность развития этих трещин определяется двумя условиями: локальным (растягивающее напряжение вблизи кончика трещины должно превышать критическое значение) и интегральным (трещина должна быть раскрыта по всей длине). Последнее условие связано с проникновением воды в трещину и поддержанием определенного гидростатического давления воды в трещине.

В теории трещин рассматривают соответствующий прочностной параметр пород – трещиностойкость. В целях оценки влияния этого параметра расчеты проведены при двух значениях трещиностойкости пород – 0,5 и 2,1 МПа·м$^{1/2}$. В расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) массива горных пород использовали метод конечных элементов.

Сначала был выполнен расчет НДС массива пород под водным объектом с учетом малой приповерхностной трещины, которая может быть локальным природным геологическим нарушением. При решении задачи рассматривали последовательное расширение пролета выработки, расположенной под водным объектом на глубине 300 м. Когда пролет выработки составил $L = 200$ м, в массиве с трещиностойкостью пород 0,5 МПа·м$^{1/2}$ началось развитие трещины за счет гидростатического давления воды, заполняющей трещину. Трещина растет до глубины 200 м, входит в область сильных сжимающих напряжений и останавливается.

Траектория развития трещины не является прямолинейной (**рис. 3**), она определяется техногенными напряжениями, которые изменяются по мере увеличения пролета выработанного пространства.

При увеличении пролета выработки на 25 м, т. е. при $L = 225$ м, изменившиеся техногенные напряжения провоцируют дальнейшее развитие трещины, которая растет в квазистатическом режиме в направлении края выработки по мере малого увеличения ее пролета.

При пролете выработки 300 м и достижении трещиной глубины свыше 275 м возможно качественное изменение ситуации, связанное с формированием локальных растягивающих напряжений в массиве пород (см. рис. 3). При низкой трещиностойкости породы возможно прорастание трещины в выработку в динамическом режиме (внезапный прорыв воды). При локально высокой трещиностойкости развитие трещины прекращается даже при последующем расширении пролета выработки.

На **рис. 4** показан профиль расхождения берегов трещины на момент ее подхода к кровле выработки. Для наглядности изображения расхождение берегов сильно увеличено. Как следует из расчетов, в этом случае трещина гидроразрыва является открытой по всей своей длине. Если трещина прорастет в выработку, то поток воды, поступающей по этой трещине в выработку, может быть катастрофическим.

Приведенные результаты расчетов в сочетании с данными моделирования при других начальных параметрах задачи позволяют сделать некоторые выводы в отношении особенностей прорыва воды из резервуара, расположенного на земной поверхности, в подземную горную выработку.

Геодинамическим условием развития протяженной трещины гидроразрыва является отсутствие в массиве пород высоких горизонтальных (тектонических) напряжений. Как правило, это условие выполняется для осадочных пород на небольших глубинах. Геомеханические условия развития трещин самопроизвольного гидроразрыва зависят от многих факторов. Одним из наиболее значимых является низкая эффективная трещиностойкость пород и возможные природные нарушения сплошности налегающего массива пород. Таким образом, открытая трещина гидроразрыва может прорасти из водоема на поверхности в лаву лишь при стечении определенных обстоятельств.

Гидрогеологическое условие развития трещины самопроизвольного гидроразрыва пород связано с низкой природной проницаемостью пород налегающей толщи. В рыхлых породах с высокой проницаемостью вода должна уходить из трещины, и вследствие этого ее роль в зарождении и развитии техногенного канала для движения воды, очевидно, будет незначительной.

Обсуждение результатов

Прогноз взаимодействия гидрогеологических и геомеханических процессов может выполняться на основе деформационного подхода и на базе моделирования напряженного состояния

массива и теории трещин. Эти подходы дополняют друг друга. В деформационном подходе исследование взаимодействия геомеханических и гидрогеологических процессов базируется на статистически обработанном материале многочисленных натурных наблюдений и позволяет интегрально отразить сложное строение реального массива горных пород. Этот подход при соответствующей доработке может быть основой для учета различных особенностей деформации подработанного массива, в частности локализации деформаций [25]. С помощью деформационного подхода и полученных на его основе расчетных формул можно выполнить необходимые оценки достаточно быстро. Вместе с тем геомониторинг деформационных процессов в массиве пород может быть эффективным инструментальным средством контроля взаимодействия геомеханических и гидрогеологических процессов на практике.

Компьютерное моделирование напряженного состояния требует больше времени и усилий для расчетов, а также соответствующих знаний, однако с помощью моделирования можно более глубоко раскрыть механизм и детали проникновения воды в подработанный массив пород и сравнить различные ситуации. Несомненными достоинствами моделирования являются учет особенностей природного поля напряжений, а также использование при необходимости современных трехмерных моделей массива и его неоднородного строения вблизи геологических нарушений. В частности, при компьютерном моделировании можно рассчитать траекторию протяженной трещины и сценарий ее развития в зависимости от изменения техногенных напряжений. Как правило, прорастание трещины гидроразрыва в выработку может происходить в несколько этапов с остановкой трещины и с возможным последующим ростом трещины при очередном техногенном изменении напряженного состояния массива пород.

Важной особенностью компьютерного моделирования является анализ ситуаций с остановившимися в развитии магистральными трещинами гидроразрыва. Если эти трещины остановились в зоне влияния выработки, то они могут порождать интенсивную локальную фильтрацию воды из трещины в выработку. Как следует из [26], сильный фильтрационный поток воды в слабосвязанной горной породе может приводить к размыву и обрушению породы из кровли выработки. Поэтому при постановке и решении задач теории фильтрации для подработанного массива горных пород необходимо учитывать возможность образования водопроводящих магистральных трещин в массиве пород.

Рассмотренные подходы к анализу взаимодействия геомеханических и гидрогеологических процессов в подработанном массиве пород дополняют имеющиеся знания об условиях проникновения воды в горные выработки и тем самым расширяют научные основы для разработки соответствующих дополнений к инструкции ведения горных работ под водными объектами.

Результаты этих исследований были представлены на организованных ВНИПИпромтехнологии V и VI Международных научно-технических конференциях «Современные инновационные технологии в горном деле при первичной переработке минерального сырья» 2018 г. и «Решение экологических и технологических проблем горных производств на территории России, ближнего и дальнего зарубежья» 2019 г. Были предложены к обсуждению результаты исследований НДС массива под влиянием техногенной нагрузки, а также способ охраны протяженных водных объектов, позволяющий предотвратить негативные для окружающей среды последствия в виде осушения самого водного объекта, заболачивания окружающей местности и затопления горных выработок. Работа в рамках проводимых ВНИПИпромтехнологии конференций стала эффективной площадкой, позволившей услышать оценки и мнения авторитетных специалистов по рассматриваемым вопросам прогноза гидрогеомеханическиих процессов при подработке водных объектов.

Выводы

1. При техногенном геомеханическом воздействии на геосреду возможны развитие необратимых гидрогеологических изменений и образование в массиве пород водопроводящих трещин, которые могут служить главными каналами для прорыва воды в горные выработки и проникновения шахтных вод на горизонты питьевой воды.

2. Прогноз взаимодействия гидрогеологических и геомеханических процессов можно выполнять на основе логично дополняющих друг друга деформационного подхода и моделирования напряженного состояния массива с учетом теории трещин.

3. Инструментальный контроль взаимодействия гидро- и геомеханических процессов можно осуществлять в рамках геомониторинга деформационных процессов в массиве пород.

Библиографический список

1. *Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н., Лукичев С. В.* и др. Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых. – М. : ИПКОН РАН, 2012. – 206 с.
2. *Трубецкой К. Н., Иофис М. А., Милетенко И. В., Милетенко Н. А., Одинцев В. Н.* Проблемы комплексного гидрогеологического и геомеханического техногенного воздействия на геосреду // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды : сб. тр. Всероссийской конф. с участием иностранных ученых. – Новосибирск, 2012. Т. 1. С. 23–28.
3. *Иофис М. А., Шмелев А. И.* Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М. : Недра, 1985. – 248 с.
4. *Барях А. А., Губанова Е. А.* О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 613–620.
5. *Камнев Е. Н., Карамушка В. П., Селезнев А. В., Морозов В. Н., Хиллер А.* Экологические проблемы и их решение при закрытии урановых производств (на примере России, СНГ и Германии) // ГИАБ. 2020. № 5. С. 26–39.
6. *Трушко В. Л., Трушко О. В.* Повышение безопасности и эффективности отработки мощных железорудных месторождений с неустойчивыми рудами // ГИАБ. 2019. Спецвыпуск 7. Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке-2. С. 298–306.
7. *Кенесбаева А., Нурпеисова М. Б.* Прогнозирование техногенных оседаний земной поверхности // Горный журнал Казахстана. 2018. № 11. С. 24–28.

8. *Норватов Ю. А.* Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых). – Л. : Недра, 1988. – 260 с.
9. *Момчилов В. С.* Защита шахт от подземных вод. – М. : Недра, 1989. – 188 с.
10. *Булат А. Ф., Бунько Т. В., Ященко И. А., Кокоулин И. Е.* Оценка риска прорыва воды и заиловочной пульпы в горные выработки как техногенной аварии // Геотехническая механика : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2018. Т. 143. С. 3–10.
11. *Норватов Ю. А., Петрова И. Б.* Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснованию мероприятий, обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий. – СПб. : ВНИМИ, 2008. – 79 с.
12. Нормативные документы в сфере деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Нормативное обеспечение охраны объектов от вредного влияния горных работ и их ведения в опасных зонах. Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль : сб. документов. Вып. 8. Сер. 07. Документы по вопросам охраны недр и геолого-маркшейдерского контроля. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 214 с.
13. *Hao Li, Haibo Bai, Jianjun Wu, Zhanguo Ma, Kai Ma* et al. A Cascade Disaster Caused by Geological and Coupled Hydro-Mechanical Factors – Water Inrush Mechanism from Karst Collapse Column under Confining Pressure // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 12. DOI: 10.3390/en10121938
14. *Jianjun Liu, Rui Song, Mengmeng Cui.* Numerical Simulation on Hydromechanical Coupling in Porous Media Adopting Three-Dimensional Pore-Scale Model // The Scientific World Journal. 2014. Vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/140206
15. *Liyuan Yu, Richeng Liu, Yujing Jiang*. A Review of Critical Conditions for the Onset of Nonlinear Fluid Flow in Rock Fractures // Geofluids. 2017. Vol. 2017. DOI: 10.1155/2017/2176932
16. *Zhaohui Chong, Xuehua Li, Xiangyu Chen, Ji Zhang, Jingzheng Lu.* Numerical Investigation into the Effect of Natural Fracture Density on Hydraulic Fracture Network Propagation // Energies. 2017. Vol. 10. Iss. 7. DOI: 10.3390/en10070914
17. *Ghan Irfan, Koehn Daniel, Toussaint Renaud, Passchier Cees*. Dynamics of hydrofracturing and permeability evolution in layered reservoirs // Frontiers in Physics. 2015. Vol. 3. DOI: 10.3389/fphy.2015.00067
18. *Bingbing Chen, Zhenhua Fu.* Analysis and Application of Water Inrush Mechanism in Tunnel Based on Thin Plate Model // AMSE JOURNALS-AMSE IIETA. 2017. Series: Modelling B. Vol. 86. No. 1. P. 221–232.
19. *Мироненко В. А., Румынин В. Г.* Проблемы гидрогеоэкологии. – 2-е изд. – М. : Изд-во МГГУ, 2002. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. – 611 с.
20. *Рыбникова Л. С., Рыбников П. А.* Геофильтрационная модель массива горных пород в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала // Литосфера. 2013. № 3. С. 130–136.
21. *Иофис М. А., Мальцева И. А.* Природа и механизм образования водопроводящих трещин в массиве горных пород // ГИАБ. 2002. № 4. С. 33–35.
22. *Гусев В. Н.* Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. 2016. Т. 221. С. 638–643.
23. *Мохов А. В.* Модель водопроницаемости горного массива в зоне сдвижения на участках подземных разработок каменноугольных залежей // Доклады Академии наук. 2017. Т. 473. № 4. С. 464–467.
24. *Одинцев В. Н., Милетенко Н. А.* Прорыв воды в горные выработки как следствие самопроизвольного гидроразрыва массива горных пород // ФТПРПИ. 2015. № 3. С. 3–16.
25. *Иофис М. А., Одинцев В. Н., Блохин Д. И., Шейнин В. И.* Экспериментальное выявление пространственной периодичности наведенных деформаций массива горных пород // ФТПРПИ. 2007. № 2. С. 21–27.
26. *Miletenko N. A., Odintsev V. N., Fedorov E. V.* Snowmelt Water Breakthrough into Coal Mine in Sub-Artic Region // Mine Water: Technological and Ecological Challenges : Proceedings of International Mine Water Association Conference. – Perm, 2019. P. 591–596. ГЖ

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 3, pp. 73–79
DOI: 10.17580/gzh.2021.03.02

Prediction of hydro-geomechanical processes in undermining of water bodies

Information about authors
K. N. Trubetskoy[1], Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences
N. A. Miletenko[1], Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, nmilet@mail.ru

[1]Academician Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract
Rivers, arable land, engineering structures, urban buildings, and communications often fall into the zone of influence of mining operations. Insufficiently justified mining development often leads to negative environmental and social consequences of the violation or destruction of these objects. On the other hand, surface and underground waters often complicate the development of minerals, negatively affecting the safety of production. The paper deals with the interaction of hydrogeological and geomechanical processes near water bodies in complex mining and hydrogeological conditions.
One field of research is based on the development of an engineering approach to the analysis of the interaction of hydrogeological and deformation processes. In this case, the results of instrumental field observations and experience of mining operations near water bodies are used. In this approach, it is assumed that six zones can be distinguished in the under-worked rock mass: collapsed rock; through cracks; partially through cracks; individual cracks that do not form a single system; the zone without discontinuities of continuity; the zone of high stresses and compression deformations. As an example of the application of this approach, the development of a mineral deposit under a river is considered and recommendations are made for the preservation of the earth's surface from waterlogging.
The second field of research is related to mathematical modeling and the use of crack theory. The results of the simulation showed that a spontaneous hydraulic fracturing crack may develop in the under-worked rock mass, which can serve as a main channel for the penetration of underground or surface water into the mine workings. The nature of spontaneous hydraulic fracturing of rocks is determined by the fact that when a man-made impact on the rock mass, one of the main stresses of the rock mass can become less than the hydrostatic pressure of water. In this case, a hydraulic fracturing crack develops in the area where this condition is met. As an example, the breakthrough of water from a surface reservoir into an underground mine is considered. It is shown that at a low crack resistance of rocks, it is possible for a crack to grow into the mine, which may result in a sudden water breakthrough. The acquired knowledge expands the scientific basis for the development of appropriate supplements to the instructions for mining operations under water bodies.
Keywords: geomechanical processes, stress state, water-conducting cracks, deformation approach, computer modeling, remediation.

References

1. Trubetskoy K. N., Kaplunov D. R., Rylnikova M. V., Radchenko D. N., Lukichev S. V. et al. Development of resource-saving and resource-reproduction geotechnologies of complex mastering of mineral deposits. Moscow : IPKON RAN, 2012. 206 p.
2. Trubetskoy K. N., Iofis M. A., Miletenko I. V., Miletenko N. A., Odintsev V. N. Problems of integrated hydrogeological and geomechanical impact on geoenvironment. *Fundamental problems of the industrial geo-environment : collection of papers of All-Russian Conference*. Novosibirsk, 2012. Vol. 1. pp. 23–28.
3. Iofis M. A., Shmelev A. I. Engineering geomechanics in underground mining. Moscow : Nedra, 1985. 248 p.
4. Baryakh A. A., Gubanova E. A. On flood protection measures for potash mines. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 240. pp. 613–620.
5. Kamnev E. N., Karamushka V. P., Seleznev A. V., Morozov V. N., Khiller A. Ecology of uranium mine closure: problems and solutions (in terms of Russia, CIS Countries and Germany). *GIAB*. 2020. No. 5. pp. 26–39.
6. Trushko V. L., Trushko O. V. Improving safety and efficiency of the development of large iron ore deposits with soft ore. *GIAB*. 2019. Special issue 7. Industrial safety of enterprises of mineral resource complex in XXI century-2. pp. 298–306.
7. Kenesbaeva A., Nurpeisova M. B. Prediction of induced ground surface subsidence. *Gornyi zhurnal Kazakhstana*. 2018. No. 11. pp. 24–28.
8. Norvatov Yu. A. Analysis and prediction of induced groundwater dynamics (during mineral mining). Leningrad : Nedra, 1988. 260 p.
9. Momchilov V. S. Mine protection from groundwater. Moscow : Nedra, 1989. 188 p.
10. Bulat A. F., Bunko T. V., Yashchenko I. A., Kokoulin I. E. Estimation of risk of water or silting pulp inrush into the mine workings as a technogeneous emergency. *Geo-Technical Mechanics : Collected Scientific Papers*. Dnepropetrovsk, 2018. Vol. 143. pp. 3–10.
11. Norvatov Yu. A., Petrova I. B. Instructional guidance for hydrogeological predictions in coal mine closure and justification of prevention of negative environmental effects. Saint-Petersburg : VNIMI, 2008. 79 p.
12. Regulatory documents in the area of activity of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service. Regulatory framework for protection from harmful effect of mines and

mining operations in hazardous zones. Subsoil conservation and survey control. Moscow : ZAO NTTs PB, 2010. 214 p.
13. Hao Li, Haibo Bai, Jianjun Wu, Zhanguo Ma, Kai Ma et al. A Cascade Disaster Caused by Geological and Coupled Hydro-Mechanical Factors – Water Inrush Mechanism from Karst Collapse Column under Confining Pressure. *Energies*. 2017. Vol. 10, Iss. 12. DOI: 10.3390/en10121938
14. Jianjun Liu, Rui Song, Mengmeng Cui. Numerical Simulation on Hydromechanical Coupling in Porous Media Adopting Three-Dimensional Pore-Scale Model. *The Scientific World Journal*. 2014. Vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/140206
15. Liyuan Yu, Richeng Liu, Yujing Jiang. A Review of Critical Conditions for the Onset of Nonlinear Fluid Flow in Rock Fractures. *Geofluids*. 2017. Vol. 2017. DOI: 10.1155/2017/2176932
16. Zhaohui Chong, Xuehua Li, Xiangyu Chen, Ji Zhang, Jingzheng Lu. Numerical Investigation into the Effect of Natural Fracture Density on Hydraulic Fracture Network Propagation. *Energies*. 2017. Vol. 10, Iss. 7. DOI: 10.3390/en10070914
17. Ghan Irfan, Koehn Daniel, Toussaint Renaud, Passchier Cees. Dynamics of hydrofracturing and permeability evolution in layered reservoirs. *Frontiers in Physics*. 2015. Vol. 3. DOI: 10.3389/fphy.2015.00067
18. Bingbing Chen, Zhenhua Fu. Analysis and Application of Water Inrush Mechanism in Tunnel Based on Thin Plate Model. *AMSE JOURNALS-AMSE IIETA*. 2017. Series: Modelling B. Vol. 86, No. 1. pp. 221–232.
19. Mironenko V. A., Rumynin V. G. Problems of hydro-geoecology. 2nd ed. Moscow : Izdatelstvo MGGU, 2002. Vol. 1. Theoretical study and modeling of geo-migration processes. 611 p.
20. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Geofiltration model of the rock mass in the field of influence of developed and liquidated mines in the Urals. *Litosfera*. 2013. No. 3. pp. 130–136.
21. Iofis M. A., Maltseva I. A. Nature and mechanism of water-permeable cracks in rocks. *GIAB*. 2002. No. 4. pp. 33–35.
22. Gusev V. N. Forecasting safe conditions for developing coal bed suites under aquifers on the basis of geomechanics of technogenic water conducting fractures. *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 221. pp. 638–643.
23. Mokhov A. V. Model of water-premeability of rock mass in the zone displacement at the sections of underground mining of stone-coal deposits. *Doklady Akademii nauk*. 2017. Vol. 473, No. 4. pp. 464–467.
24. Odintsev V. N., Miletenko N. A. Water inrush in mines as a consequence of spontaneous hydrofracture. *Journal of Mining Science*. 2015. Vol. 51, Iss. 3. pp. 423–434.
25. Iophis M. A., Odintsev V. N., Blokhin D. I., Sheinin V. I. Experimental investigation of spatial periodicity of induced deformations in a rock mass. *Journal of Mining Science*. 2007. Vol. 43, Iss 2. pp. 125–131.
26. Miletenko N. A., Odintsev V. N., Fedorov E. V. Snowmelt Water Breakthrough into Coal Mine in Sub-Artic Region. *Mine Water: Technological and Ecological Challenges : Proceedings of International Mine Water Association Conference*. Perm, 2019. pp. 591–596.

Уважаемые коллеги!

От имени коллектива Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН и Научного совета РАН по проблемам горных наук поздравляем АО «ВНИПИпромтехнологии» с 70-летием со дня образования!

Празднование юбилея – важное событие как в жизни отдельного человека, так и в деятельности учреждения, а также это подведение итогов, гордость за полученные результаты и успехи, стремление к новым горизонтам.

Ваш Институт известен как головной научный центр российского рынка инжиниринговых услуг для атомного и горнодобывающего секторов с сильными компетенциями в области экологической и радиационной безопасности. За пройденные годы вашим коллективом внесен весомый вклад в выполнение программы развития ядерной энергетики, использования ее для строительства специальных подземных сооружений и изучения земной коры. Отдельно следует отметить выполнение комплекса работ в рамках реализации мероприятий, направленных на создание Единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами, которая проводилась по заказу Госкорпорации «Росатом».

Коллектив вашего института на протяжении 70 лет с несомненным достоинством выполняет свою основную миссию как полноценный Инжиниринговый центр Уранового холдинга, реализующий комплексные проекты полного цикла – от разработки технических решений до поставки и установки необходимого оборудования, включая изыскания и проектирование, используя при этом богатый опыт одного из старейших проектных институтов.

На протяжении многих лет ваш Институт тесно сотрудничает с ИПКОН РАН не только при реализации совместных научных проектов, но и на поприще проведения международных научно-технических конференций, ставших знаковой площадкой для генерации идей ученых России и других стран в атомном, горнодобывающем и смежных секторах. Глубоко убеждены, что это сотрудничество будет крепнуть и развиваться и впредь.

Мы с гордостью отмечаем, что с вашим институтом нас объединяют не только научные интересы, но и дружеские связи.

Значимый вклад в дело формирования личности ученого и обеспечения преемственности поколений вносит проводимая в стенах вашего Института Школа молодого специалиста как гарант передачи опыта и накопленных за многие годы деятельности знаний, как важный элемент подготовки высококвалифицированных кадров. Высокий научный потенциал уже состоявшихся ученых, помноженный на рвение и оптимизм молодых научных сотрудников, является тем золотым фондом, который гарантирует стабильное развитие вашего учреждения.

Уверены, что и в дальнейшем вас ждут новые открытия и разработки, обеспечивающие решение многих фундаментальных и прикладных задач в области проектирования и инжиниринга.

В день славного юбилея желаем всему коллективу АО «ВНИПИпромтехнологии» творческих успехов, вдохновения и неиссякаемого энтузиазма, благополучия и процветания, многих лет плодотворной работы на благо России!

Директор ИПКОН РАН,
член-корреспондент РАН
В. Н. Захаров

Председатель Научного совета РАН
по проблемам горных наук,
Советник Президиума РАН
академик РАН
К. Н. Трубецкой