

УДК 622.014

И.В. Милетенко, Н.А. Милетенко, В.Н. Одинцев

**НОВЫЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗУ
ОПАСНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ**

Предложен новый подход для прогнозирования возможных катастрофических проявлений миграции и движения подземных вод вблизи горных выработок. В основу подхода положены некоторые разработки в области геодинамики и теории трещин. Подход позволяет комплексно учитывать взаимовлияние гидрогеологического и геомеханического процессов.

Ключевые слова: геомеханика, геодинамика, гидрогеология, разработка полезных ископаемых, разрушение пород.

Вода является важнейшей компонентой жизнедеятельности людей, определяющей не только экономические и хозяйственные вопросы жизни общества, но и глубинные вопросы его выживания. По опубликованным данным на Земле имеется примерно 41 млн. куб. километров пресной воды, из которых 36 млн. куб. км приходится на полярные льды, 4 млн. куб. км на подземные воды, 1 млн. куб. км на поверхностные воды. Подземные воды, превышающие в четыре раза запасы поверхностных вод, являются важным ресурсом пресной воды, требующим совершенствование научной базы и технологии его освоения.

В России разработан и используется комплекс мероприятий, направленных, с одной стороны, на обеспечение сохранности подземных водных объектов при освоении недр, с другой стороны – на предотвращение прорывов подземных вод в горные выработки, что в ряде случаев ведет к гибели горнорабочих и к большому экономическому ущербу. Несмотря на

комплекс предпринимаемых мер за один только год по самой грубой оценке произошло примерно десять случаев во время не предотвращенных, опасных гидро-геомеханических событий при разработке полезных ископаемых, повлекших значительный ущерб. Это свидетельствует о необходимости совершенствования методологии прогнозирования возможных катастрофических проявлений миграции и движения подземных вод вблизи горных выработок; необходимости изучения механизма взаимовлияния геомеханических и гидрогеологических явлений при разработке полезных ископаемых.

Развитие представлений о гидрогеологических процессах при разработке полезных ископаемых основывается на большом опыте фундаментальных, прикладных и натурных исследований. К настоящему времени сформировались различные подходы к исследованиям миграции воды в массивах горных пород, которые определяются не только конкретной тематикой практических задач, но и

различной методической базой аналитических и экспериментальных исследований. Например, в связи с горной тематикой гидрогеологические проблемы подземных вод решаются на основе моделей линейной и нелинейной фильтрации [1-4], на основе инженерного обобщения натуральных и статистических данных [5], с учетом изменения геомеханических (в основном деформационных) процессов [6, 7].

Анализ условий прорыва вод в горные выработки из водонасыщенных пластов или техногенных резервуаров показывает, что эти опасные явления большей частью связаны с образованием новых техногенных каналов – крупных трещин или даже протяженных разрушенных зон в массиве пород для движения воды. В рамках фильтрационных моделей такие случаи описать не удастся, поэтому в анализ гидрогеологических условий разработки необходимо включить новый элемент – анализ техногенного макроразрушения массива горных пород. Этот анализ должен включать исследование особенностей и закономерностей стадии предразрушения пород и стадии критического разрушения массива и образования магистральных трещин для движения воды. Анализ техногенного макроразрушения массива пород имеет большое значение как в отношении прогноза прорыва природных вод в горные выработки, так и в отношении прогноза миграции загрязненной рудничной воды на горизонты питьевой воды и решения других экологических проблем.

Учет техногенного разрушения массива горных пород должен включать (помимо деформаций) анализ напряженного состояния горных пород и использование адекватных теорий прочности и критерия разруше-

ния. Модели и критерии разрушения могут быть разными. Нам представляется, что во многих случаях наиболее адекватной методологией разрушения может быть теория трещин отрыва, в рамках которой можно оценивать не только возможность разрыва материала, но и оценивать траектории развития магистральных трещин, а также режим их развития (квазистатический или динамический).

В частности, используя фундаментальные и прикладные разработки в теории трещин можно оценить возможность природного гидроразрыва пород, т.е. гидроразрыва за счет давления природной воды при изменении (уменьшении) величины горного давления. При технологическом гидроразрыве пород, который, например, используется как прием повышения нефтеотдачи пласта или в качестве метода измерения напряжений, давление закачиваемой в массив воды является единственным активным фактором разрушения массива пород. В случаях природного гидроразрыва пород, описанных в литературе по материалам геологических исследований, давление природной воды способствует разрушению массива, если уменьшаются вследствие тектонофизических процессов природные механические напряжения в массиве пород.

Гидроразрыва пород может произойти и в случае техногенного изменения напряженного состояния массива пород. В самом простом случае условие природного гидроразрыва может быть записано в виде $|P| \geq |\sigma_{min}|$, где

P – природное гидростатическое давление воды, σ_{min} – наименьшая главная компонента техногенных сжимающих напряжений. Ясно, что возможность природного гидроразрыва массива зависит от величины

техногенного снижения напряжений. Соответствующую оценку можно сделать в рамках общего расчета перераспределения напряжений при техногенном воздействии на массив пород.

В общем случае методика моделирования условий развития трещин природного гидроразрыва может включать: 1) расчет (например, методом конечных элементов) напряженно-деформированного состояния массива горных пород при конкретных условиях техногенного воздействия на массив; 2) оценку влияния граничных условий, определяемых природными факторами; 3) определение конфигурации областей в массиве горных пород, в которых выполняется условие роста трещины, и оценку возможности прорастания трещин гидроразрыва в горные выработки; 4) расчет изменения напряженного состояния массива пород в результате образования магистральных трещин; 5) оценку в рамках теории трещин возможного режима развития трещины (квазистатический или динамический).

Для расчета техногенного напряженно-деформированного состояния массива горных пород важна постановка геомеханической задачи, которая должна определять не только техногенные факторы (изменение геометрии выработанного пространства и факторы, отражающие технологию добычи), но и исходное геомеханическое и геологическое природное состояние массива, а именно природные условия, которые влияют на техногенное горное давление [8].

Условия и соотношения, которые предопределяют исходные условия задачи и условия формирования техногенного горного давления, оцениваются в рамках геодинамики (науки о действующих силах и процессах в

недрах Земли в ходе ее планетарной эволюции). Применительно к проблемам разработки полезных ископаемых в геодинамике рассматриваются следующие факторы: а) величины исходных главных напряжений; б) направления действия главных напряжений; г) тектоническая структура; д) тектонические деформации пород; е) геологическая и механическая неоднородность массива пород; ж) условия нагружения (мягкое, жесткое) и др. Эти факторы влияют на постановку задачи в качестве исходных данных и начальных условий.

В качестве примера возможного влияния исходных главных напряжений и значимости их в оценке гидрогеомеханических последствий рассмотрим модельную задачу о возможном нарушении водоупора в процессе отработки калийного пласта (некоторый аналог условий разработки одного из рудников Верхнекамского калийного месторождения). При разработке рудника существует риск проникновения воды в горные выработки по техногенной трещине, в результате чего может произойти затопление рудника.

Схема к модельной задаче показана на рис. 1, а. Горизонтальный пласт калийной соли отделен от вышележащего водонасыщенного пласта водоупором, мощностью 60 м. Площадь подработки составляет 660 м. Горное давление на калийный пласт, обусловленное весом вышележащих пород, составляет 10 МПа. Модуль упругости водоупора составляет $E = 5 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Целики изначально находятся в упругом состоянии, однако с течением времени соляные целики могут перейти в пластическое состояние (или состояние текучести), например вследствие развития реологи-

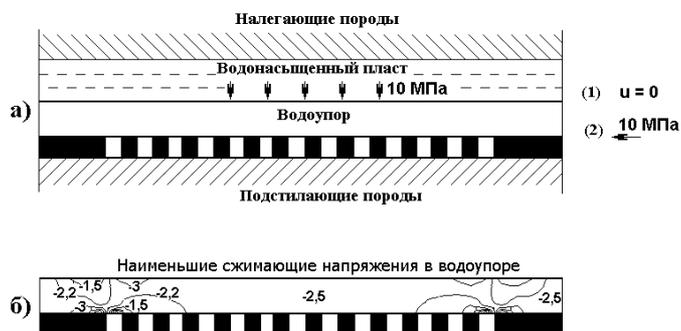


Рис. 1. (а) – схема к постановке задачи; (б) – распределение наименьших сжимающих напряжений в водоупоре σ_{\min} в схеме заданных смещений при упругом деформировании целиков

ческих процессов. Пластическое состояние характеризуется более чем десятикратным увеличением податливости целиков при сохранении их напряженного состояния.

Рассматриваются два характерных случая природных напряжений: схема жесткого защемления массива (модель А.Н. Динника) и условия равенства вертикальных и горизонтальных напряжений (условия «гидростатики»). В первом случае считается, что горизонтальные смещения по границе рассматриваемой области отсутствуют (в этом случае величина горизонтальных природных напряжений меньше природных вертикальных на величину множителя, равного $\nu/(1-\nu)$). Во втором случае на границе рассматриваемой области задаются горизонтальные («тектонические») напряжения, равные по величине вертикальным.

Различие в задании различных граничных условий предопределяет, помимо прочего, различие в условиях нагружения массива. Задание смещений отвечает схеме жесткого нагружения, задание напряжений отвечает схеме мягкого нагружения массива. Различные схемы нагружения опреде-

ляют различные условия разрушения. В частности, на «жестких» прессах в режиме заданных деформаций реализуется «запредельное» деформирование пород, на «мягких» прессах в режиме заданных напряжений имеет место динамическое разрушение пород, режим «запредельных» деформаций не реализуется.

В задаче находится распределение главной минимальной компоненты напряжений в водоупоре и влияние на распределение напряжений фактора перехода целиков в пластическое состояние и увеличения смещения налегающей кровли. В условиях плоской деформации рассматривается упругая модель водоупора. Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 1, б; 2, а, б; 3, а, б.

На рисунках показаны изолинии наименьших главных сжимающих напряжений в водоупоре (напряжения сжатия отрицательны, напряжения растяжения – положительны). Изолинии концентрируются, главным образом, вблизи границ неоднородного деформирования, а именно на границе калийного пласта и области упругих целиков (рис. 1, б), на границе области упругих и «пластических» целиков (рис. 2, 3). Некоторые изолинии простираются от выработанного пространства до водонасыщенного пласта.

По результатам проведенных расчетов можно заключить следующее. Напряжения сжатия в водоупоре в случае «гидростатики» в среднем примерно в четыре раза выше по сравнению со случаем схемы нагружения А.Н. Динника.



Рис. 2. Распределение наименьших сжимающих напряжений в водоупоре при соотношении 0,6 упругих целиков (показаны черным цветом) к пластичным целикам (показаны штриховкой): (а) – схема заданных смещений; (б) условия «гидростатики» исходных напряжений



Рис. 3. Распределение наименьших сжимающих напряжений в водоупоре при соотношении упругих и пластичных целиков 0,2: (а) – схема заданных смещений; (б) условия «гидростатики» исходных напряжений

Это означает, что в условиях «гидростатического» поля природных напряжений условия для образования водопроницающих трещин наименее благоприятны. Если природное поле напряжений отвечает модели А.Н. Динника, то, вообще говоря, возможно образование макрообластей с очень низкими напряжениями сжатия. Эти области простираются от выработанного пространства до водонасыщенного пласта. В этих областях может выполняться условие природного гидроразрыва.

Как следует из рис. 2, а такая ситуация может случиться, когда отно-

шение площадей, занимаемых упругими и пластическими целиками, становится меньше 0,6. В частности, когда это отношение становится равным 0,2, то, как следует из рис. 3, а, напряжения в области, простирающейся от водонасыщенного пласта к выработанному пространству, даже являются растягивающими, т.е. образование в них магистральных трещин отрыва неизбежно даже без учета распирающего действия природной воды. Как можно заключить из изолиний распределения напряжений рис. 3, а, возможные трещины природного гидроразрыва, развивающиеся в областях растяжения, не обязательно развиваются по кратчайшему пути, связывающему водонасыщенный пласт и выработанное пространство.

Путь развития трещин предопределен особенностями распределения техногенных напряжений.

Таким образом, проведенное исследование показало, что условие образования в водоупоре магистральных трещин отрыва зависит по крайней мере от двух факторов – природного фактора (исходные напряжения в массиве) и техногенного фактора (переход целиков в пластическое состояние, что определяется мощностью оставляемых целиков). При увеличении податливости целиков в аспекте длительности времени (несмотря на сохранение несущей способности це-

ликов по напряжениям) также возможно образование областей растяжения, в которых сжимающие напряжения имеют минимальные значения (рис. 3, б). В этих областях возможно образование магистральных трещин природного гидроразрыва, если гидростатическое давление в водонасыщенном пласте выше минимальных техногенных напряжений сжатия.

Основной вывод работы.

В работе на модельном примере показано, что учет природных особенностей напряженного состояния и техногенного разрушения массива пород может дать дополнительные

возможности для правдивой оценки изменения гидрогеологических условий при добыче полезных ископаемых. Для учета этих факторов необходимо располагать данными о геомеханическом состоянии пород, которые обсуждаются в рамках геодинамики, геологии, тектонофизики. Следовательно, прогноз изменения гидрогеологических условий должен быть междисциплинарным исследованием, в котором определяющее значение имеет геомеханическая модель образования техногенных каналов для миграции природных флюидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мироненко В.А., Румынин В.Г.* Проблемы гидрогеологии. Том 1. – М.: Изд.МГТУ, 2002, 611 с.
2. *Шестаков В.М.* Гидрогеодинамика. – М.: Изд.МГУ, 1995, 368 с.
3. *Гальперин А.М.* Геология. Часть III. – Гидрогеология. – М. Мир горной книги: Изд.-во МГТУ, 2008, 400 с.
4. *Норватов Ю.А.* Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых). – П.: Недра, 1988, 261 с.
5. *Момчилов В.С.* Защита шахт от подземных вод. – М.: Недра, 1989. – 189 с.
6. *Иофис М.А., Мальцева И.А.* Природа и механизм образования водопродящих трещин в массиве горных пород // ГИАБ. – 2002. - №4. – С.33-35.
7. *Методические указания* по изучению и прогнозу техногенного режима подземных вод при освоении угольных месторождений. – СПб, 1992, 107 с.
8. *Одинцев В.Н. Милетенко И.В., Милетенко Н.А.* Геомеханическая оценка изменения гидрогеологических условий налегающих пород при скважинной гидродобыче железных руд // Маркшейдерия и недропользование. – 2010. - №5. – С. 51-54. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Одинцев Владимир Николаевич – доктор технических наук, Учреждение Российской академии наук Институт проблем комплексного освоения недр РАН; Odin-VN@yandex.ru
Милетенко Игорь Васильевич – доктор технических наук, Учреждение Российской академии наук Институт проблем комплексного освоения недр РАН; miletiv@mail.ru
Милетенко Наталья Александровна – кандидат технических наук, Учреждение Российской академии наук Институт проблем комплексного освоения недр РАН; nmilet@mail.ru

