

УДК 622.02 : 539.3

**ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА
И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ
ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ ВЫРАБОТОК ЗАКРЫТЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

М. Буковская, П. Буковский

*Центральный горный институт,
E-mail: mbukowska@gig.eu, пл. Гваркова, 1, 40-166, г. Катовице, Польша*

Выполнена оценка угрозы затопления и обоснован выбор методов его предотвращения в областях повышенного водонасыщения и интенсивных фильтрационных процессов в Верхнесилезском каменноугольном бассейне. Такая оценка актуальна для областей, граничащих с закрытыми и затопленными шахтами, что обуславливает необходимость рассмотрения повторного насыщения водой пород действующих шахт. В направлении реструктуризации шахт рассмотрено изменение состояния массива при горных ударах. Дана оценка склонности массива к горным ударам в пограничных областях между действующими и закрытыми шахтами.

Склонность к горным ударам, геомеханическая угроза, затопление, закрытие шахты

DOI: 10.15372/FTPRPI20210506

Угрозы, возникающие в среде обитания человека, могут быть разделены на три группы. К первым двум относятся биологические угрозы, возникающие под влиянием живых организмов, в том числе людей, и техногенные, которые возникают при функционировании технических объектов. К третьей группе относятся также природные угрозы, не связанные с деятельностью человека.

Наиболее опасны при подземной добыче полезных ископаемых горные удары, внезапные выбросы угля и газа, взрывы угольной пыли, затопление, изменение климатических условий, обусловленное эмиссией парниковых газов, оползни, радиоактивность и т. д. Некоторые из природных угроз, возникающих при проведении горных работ, носят катастрофический характер. Горные удары относятся к данной категории. В Польше они обычно происходят при подземной добыче медной руды и каменного угля.

Подземная добыча полезных ископаемых осуществляется по всему миру с древнейших времен. За последние 200 лет технология добычи топливно-энергетических ресурсов, таких как каменный уголь, пережила существенную эволюцию. Каменный уголь был тем ресурсом, который обеспечил технологический скачок в сфере традиционного производства электроэнергии и в промышленной сфере. Тем не менее за последние 25 лет потребность цивилизации в угле

Работа является частью проекта Methenergy Plus, который профинансирован Фондом исследований угольной и стальной промышленности (UE) (грант № 754077).

и общее отношение к нему значительно изменились. В некоторых высокоразвитых странах, таких как Франция, Германия и Великобритания, уголь больше не является основным топливно-энергетическим ресурсом, объем добычи угля в Польше снижается. Бывшие страны-участники Организации Варшавского Договора также начали снижать объем добычи угля после присоединения к мировому рынку в 1989 г. [1]. Несмотря на то, что угледобывающая промышленность продолжает играть значительную роль в экономике Польши, предприняты шаги к реструктуризации горнодобывающей промышленности и систематическому закрытию шахт.

Закрытие угольных шахт началось после принятия в 1994 г. нового Горно-геологического устава. Прекращена добыча каменного угля в Нижнесилезском каменноугольном бассейне, шахты затоплены. В данном бассейне отсутствует угроза горных ударов, а среди всех геотехнических угроз наиболее существенным является оседание породы. В Люблинском каменноугольном бассейне находится одна действующая шахта, в которой до сих пор не произошло ни одного горного удара (массив сложен породами с низкими деформационными характеристиками и насыщен водой). В польской части Верхнесилезского каменноугольного бассейна закрыто более чем 2/3 шахт. Большинство действующих шахт расположено по соседству с закрытыми шахтами, которые частично затоплены [2–4]. В некоторых шахтах системы водоотведения вышли из строя, в результате чего шахты превратились в водные резервуары с объемом в несколько десятков миллионов кубических метров. В действующих шахтах, расположенных вблизи закрытых затопленных шахт, возникла новая опасность, связанная с повышением давления воды и, следовательно, ростом напряжений, что может спровоцировать горный удар. Данная угроза предотвращается строительством и модернизацией системы горных выработок, по которым вода поступает в системы водоотведения до изолированных водных резервуаров в закрытых шахтах, поддерживая безопасный уровень [5, 6]. Некоторые меры безопасности (возведение искусственных конструкций, строительство каналов для управления потоками воды из закрытых шахт в действующие) требуют новых подходов в области геомеханики, в которых учитывается склонность породного массива к горным ударам.

Из-за реструктуризации горнодобывающей промышленности количество действующих угольных шахт сократилось с 70 в 1980-х до 12 в настоящее время. Таким образом, наблюдается значительное снижение горных ударов, происходящих в шахтах, из-за их закрытия. Другим фактором, влияющим на геомеханические параметры, является попытка поддержания объема добычи в действующих шахтах, что привело к увеличению глубины добычи. Такая практика повышает вероятность возникновения геомеханических угроз, в частности горных ударов.

В ходе реструктуризации отрасли образовались новые области низкой устойчивости массива, которые расположены на границе между действующими и закрытыми шахтами. Частичное или полное отключение системы водоотведения в закрытых и затопленных шахтах влияет на оставшиеся участки месторождений, которые расположены вблизи поверхности [7, 8]. Образование водных резервуаров большого объема между шахтами способно создать новые угрозы. Данные области требуют исследования влияния воды на геомеханические свойства, включая прочность породы и массива, как и другие области, где планируются инженерные инвестиции [9–15].

ГОРНЫЕ УДАРЫ В ВЕРХНЕСИЛЕЗСКОМ КАМЕННОУГОЛЬНОМ БАССЕЙНЕ

Основные природные угрозы, возникающие в процессе добычи угля в Верхнесилезском каменноугольном бассейне (ВКБ), такие как горные толчки и горные удары в выработках, определяются природными свойствами геологической среды, к которым относят литологические и петрографические свойства породы, содержание влаги в массиве, глубина и геологиче-

ская история (рис. 1). Эти явления происходят вследствие разрушения структуры массива за счет образования трещин в хрупкой породе и динамического смещения вдали от выработки (горный толчок) или в непосредственной близости от нее (горный удар) [16]. Изменение геологических и горнотехнических условий повышает вероятность возникновения опасных геодинамических явлений в массиве горных пород.



Рис. 1. Расположение Верхнесилезского каменноугольного бассейна в Польше

Сейсмическая активность в ВКБ отслеживается региональными сейсмологическими станциями при Центральном горном институте в Катовице и локальными сейсмологическими сетями, расположенными в каменноугольных шахтах. К настоящему времени различают два типа сейсмических толчков, происходящих в Верхнесилезском каменноугольном бассейне, к ним относятся природные толчки и толчки, связанные с горной деятельностью [17]. В период с 2007 по 2019 г. в ВКБ произошло 14823 толчка с энергией до 10^9 Дж, 80 % из которых превышали 10^5 Дж. Среди них 36 толчков обладали энергией между 10^8 и 10^9 Дж.

Центр сейсмического толчка, откуда энергия упругой деформации распространяется в массив, расположен в слоях пород, окружающих угольный пласт. Горный удар представляет собой частный случай сейсмического толчка. Под влиянием горного удара в условиях шахты могут возникнуть другие угрозы, такие как выделение метана или затопление [18].

Согласно исследованиям, наиболее важной особенностью горного удара является внезапное изменение равновесного состояния в массиве пород и переход от неустойчивого состояния массива к устойчивому. Изменение равновесного состояния в результате внезапного изменения напряжений, которое вызвано горнодобывающей деятельностью на месторождении, приводит к сейсмическому толчку. Явление горного удара в выработке смоделировано в лабораторных условиях [21]. Отношение между упругостью массива пород, окружающих горную выработку, и геомеханическими свойствами угольного пласта играет важную роль в прогнозировании горных ударов [22].

Статистические данные по горным ударам в ВКБ существуют с 1949 г., когда было зарегистрировано более 500 ударов. В последующие годы количество горных ударов снизилось до 124. До 1975 г. на территории ВКБ отмечалось несколько десятков горных ударов в год. Снижение их количества в настоящее время — результат влияния нескольких факторов. Наиболее важные из них — малое число действующих шахт, уменьшение объема добычи каменного угля, улучшенная технология добычи, более эффективные технологии предотвращения горных ударов.

В прошлое десятилетие большая часть горных ударов происходила на глубинах 720–1150 м [23]. В период с 2006 по 2019 г. в выработках отмечено 34 горных удара в различных литостратиграфических и структурных областях ВКБ (рис. 2). В этот период горные удары наблюдались в формациях песчаника ВКБ (25 ударов): 19 ударов в формациях Сиодлов

и 6 ударов в формациях Руда (табл. 1). В рассматриваемый период в породе, которая младше формаций Заленже и содержит мадстоун, произошло два горных удара. В более старших формациях (Жакловиц), которые относятся к паралическому периоду и в которых добыча осуществляется на больших глубинах, зафиксировано семь горных ударов.



Рис. 2. Геологическая карта формаций каменноугольного периода в ВКБ [24]: 1 — формации песчаника Краков; 2 — формации мадстоуна; 3 — Верхнесилезские формации песчаника; 4 — паралические формации; 5 — надвиг Орлов; 6 — карпатский надвиг; 7 — граница гидрогеологических субрегионов

ТАБЛИЦА 1. Стратиграфическая классификация формаций Верхнего каменноугольного периода польской части ВКБ (упрощенная версия)

Хроностратиграфическое разделение		Литостратиграфические формации		Номер пластов	Максимальная мощность, м
Каменноугольный период	Вестфалиан	Формации песчаника Краков	Либенж	110 – 119	560
			Лазиска	201 – 215	1080
		Формации мадстоуна	Ожеше	301 – 326	2000
			Заленже	327 – 406	
	Намур	Верхнесилезские формации песчаника	Руда	407 – 419	810
			Сиодлов	501 – 510	140
			Ейковице	—	150
		Паралические формации пограничных слоев	Пореба	601 – 630	100
			Жакловиц	701 – 723	380
			Грушув	801 – 848	1300
			Петшиковице	901 – 915	760

Данные по горным ударам, произошедшим в ВКБ с 2006 по 2019 г., проанализированы с хроностратиграфической и структурной точек зрения (табл. 2).

Природные угрозы в ВКБ, характерные для верхних слоев земной коры, связаны с геологической структурой области. Геологическими факторами, влияющими на предрасположенность массива горных пород к горному удару, являются следующие:

- литологические и петрографические свойства формаций;
- содержание влаги, т. е. степень водоотведения из массива;
- геомеханические свойства пустой породы и угля.

ТАБЛИЦА 2. Структурное и хроостратиграфическое расположение угольных пластов в горных выработках, где произошли горные удары

Глубина и энергия сейсмического толчка	Основной канал		Канал Бытом		Главная седловина		Канал Ейковице	
	Верхнесилезские формации песчаника		Верхнесилезские формации песчаника		Формации мадстоуна		Верхнесилезские формации песчаника	
	Руда		Сиодлов		Заленже		Сиодлов	
D , м	950 – 1069		550 – 983		585		1050	
E , Дж	$3.9 \cdot 10^6 - 4 \cdot 10^9$		$2 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^8$		$8 \cdot 10^6$		$4 \cdot 10^7$	

и формации песчаника Краков преобладает полимиктический песчаник. В более старших пограничных слоях (формации Паруба, Жакловиц, Грушов, Петшиковице) доминируют тонкие слои песчаника (грауваковый или полимиктический) с включением кварцевого песчаника. В формациях Руда и Ожеше залегают тяжелые и второстепенные минералы: циркон, турмалин и апатит. На пограничных формациях и формациях Сиодлов среди второстепенных минералов господствует биотит. Расположение породы-коллектора в области осаждения и степень свободного дренирования также имеет значение.

Мощные формации песчаника, потенциально предрасположенные к толчкам, зачастую разделены тонкими слоями мадстоуна. Несмотря на то, что мадстоуны обладают большей прочностью по сравнению с песчаниками, их наличие разделяет массив на области и снижает его упругость. Аргиллиты присутствуют в различных формах: серый песчаный аргиллит, детрит темно-серого аргиллита и аргиллит с включениями глинистого железняка, мадстоуна или песчаника. Аргиллиты наименее прочные вмещающие породы, окружающие угольные пласты. Тем не менее локальные укрепления их структуры способны значительно повысить геомеханические свойства. Наиболее часто аргиллиты залегают в вертикальном профиле формаций мадстоуна.

Так как уголь является органической породой, он обладает крайне неравномерной петрографической структурой, которая значительно влияет на его свойства, включая предрасположенность массива к горному удару. В области разработки угольный пласт находится в постразрушенном состоянии.

Благодаря влиянию литологических свойств массива на его предрасположенность к горному удару, можно сделать вывод, что даже при наличии слоев кластических пород в вертикальном профиле известны случаи, когда на протяжении нескольких десятилетий горнодобывающей деятельности в выработках не происходили горные удары. В ходе оценки предрасположенности массива к горному удару необходимо учитывать качество окружающих выработку пород и качество каменного угля.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПУСТЫХ ПОРОД И УГЛЯ НА ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ МАССИВА К ГОРНОМУ УДАРУ

Геомеханические свойства пород каменноугольного периода ассоциируются с осадочным состоянием молассовых месторождений над более старой подстилающей породой с диагенетическими процессами, такими как преобразование непрочных залегающих осадков в консолидированную породу. В результате циклического повторяющегося осаждения вмещающих пород и угольных пластов они различаются по возрасту, петрографическим свойствам и минеральному составу. Это подтверждается разнообразием их вертикального и горизонтального профиля. Наблюдения, выполненные в процессе эксплуатации шахты ВКБ, показали значительные различия геологического состояния пород на коротких расстояниях. Данное явление также характерно для геомеханических свойств пород.

Развитие исследований геомеханических параметров в Польше. Геомеханические параметры массива, влияющие на его предрасположенность к горному удару, разделены на пред- и посткритические в зависимости от нагрузки породы различными напряжениями. Напряженно-деформированное состояние пред- и посткритических участков обуславливает прочность, упругость, деформацию и энергию. Исследования по данной теме начались в Польше в 1980-е годы.

В результате использования новых инструментов для геомеханических исследований возможности оценки свойств массива пород значительно возросли. В Польше за 35 лет в лабораторных условиях выполнены исследования всего диапазона характеристик разрушения породы. Новые возможности применялись для оценки предрасположенности массива пород к горному удару и, как следствие, для оценки уровня угрозы со стороны массива [25].

В основе использованных методов — исследование различных элементов процесса, включающих подготовку лабораторных образцов, выполнение одноосных и трехосных нагруженных испытаний, определение оптимальных размеров образцов исследуемой породы, изучение влияния петрографических и структурных различий [26]. Для оценки предрасположенности массива к горному удару и его угрозы осуществлены типовые испытания [27]. Например, метод W_{ET} использован для оценки возникновения горного удара на любом месторождении или в горной выработке [28]. В Польше после 2000 г. для анализа результатов испытаний и оценки качества массива и его предрасположенности к горному удару внедрен метод, основанный на осадочной природе каменноугольных месторождений. Массив горных пород включен в изменяющийся литостратиграфический профиль, окружающий выработки, расположенные на 100 м выше и на 30 м ниже рабочей зоны шахты. Разработаны новые методы оценки предрасположенности массива к горному удару, включая показатели W_{TG} и W_{Ek} , а также систему оценки GEO [25]. В последние десятилетия наблюдались попытки выявить зависимость между результатами геомеханических испытаний и фактическим содержанием влаги в породе, измеренным непосредственно в шахте. Проведено исследование влияния различных факторов (не только воды), связанных с горнодобывающей деятельностью, на результаты оценки предрасположенности массива к горному удару.

Считается, что одним из ключевых факторов возникновения сейсмических толчков и угрозы горных ударов является процесс реструктуризации угледобывающей промышленности, который начался в 1990 г. и продолжается усиленными темпами. Данный процесс значительно влияет на количество горных ударов в шахтах, а также на предрасположенность массива к горному удару на участках, где происходит изменение гидрогеологического состояния. Грамотное применение геомеханических испытаний — ключевой способ оценки геомеханических угроз (горных ударов) и угрозы затопления. Планирование и внедрение таких испытаний необходимо для прогнозирования последствий затопления или дренирования массива в действующих и закрытых шахтах.

Результаты определения основных геомеханических параметров. Основные геомеханические параметры, проанализированные для оценки предрасположенности массива к горному удару: прочность на одноосное сжатие; упругость породы (т. е. модуль Юнга); запредельное деформирование нагруженной породы (посткритический модуль).

Значение некоторых параметров существенно изменяется в зависимости от глубины залегания слоев. Примером такого параметра является прочность на одноосное сжатие UCS (рис. 4).

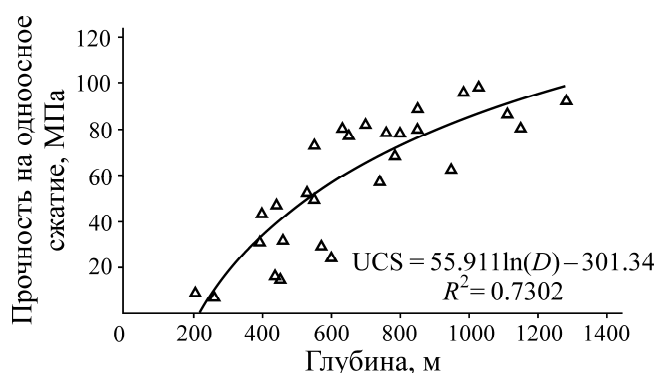


Рис. 4. Зависимость средней прочности на сжатие от глубины залегания песчаника ВКБ: 28 слоев пород, 233 лабораторных образца, отношение площади сечения к высоте образца — 1

На территории ВКБ залегают песчаники и мадстоуны с различным значением UCS (рис. 5). Доля углей с определенной прочностью на сжатие приведена на рис. 6.

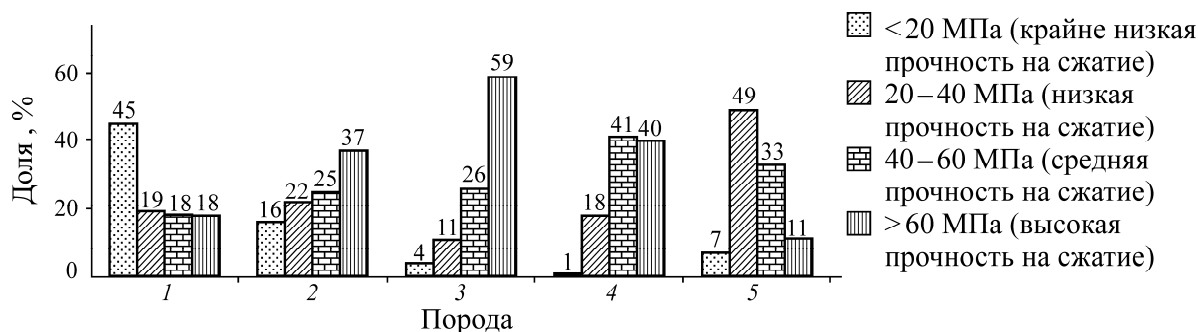


Рис. 5. Доли песчаников, мадстоунов и аргиллитов по средним значениям прочности на сжатие (n — количество образцов): 1 — крупнозернистый песчаник, $n=456$; 2 — среднезернистый песчаник, $n=1830$; 3 — мелкозернистый песчаник, $n=3695$; 4 — мадстоун, $n=5800$; 5 — аргиллит, $n=9480$

Во вмещающих породах ВКБ (аргиллиты, песчаники и мадстоуны) наблюдается повышение средней прочности на сжатие в более старших стратиграфических формациях. Наиболее распространенными группами вмещающих пород с учетом неравномерности прочности на сжатие являются следующие:

- средне- и мелкозернистые песчаники с высокой прочностью на сжатие (>60 МПа);
- крупнозернистые песчаники с низкой прочностью на сжатие (<20 МПа);
- мадстоуны со средней прочностью на сжатие (40–60 МПа) или с высокой прочностью на сжатие (>60 МПа);
- аргиллиты с низкой прочностью на сжатие (20–40 МПа).

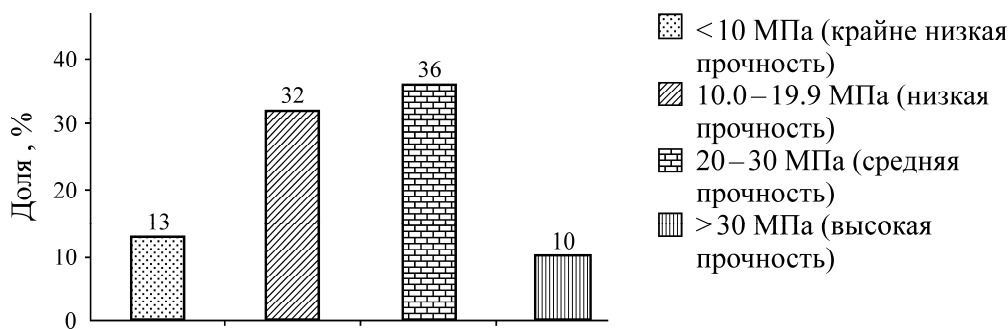


Рис. 6. Доля углей по среднему значению прочности на сжатие в принятых диапазонах ($n=19535$ — количество образцов)

Согласно данным рис. 6, угли с низкой или средней прочностью на сжатие (10–30 МПа) составляют более 75 % от всех исследованных углей в литостратиграфических группах ВКБ. Наблюдаются неравномерные изменения средних значений UCS, связанные с возрастом углей. Испытания также выявили изменения пористости углей в зависимости от возраста. Более старый уголь обладает меньшим отношением открытой пористости к общей. Учитывая сложную тектоническую структуру ВКБ и различие пористости, глубина залегания угля определенной структуры существенно влияет на открытую пористость, связанную с возрастом угля [29].

Упругость пород описывается модулем Юнга, который представляет собой коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением (сжатие или растяжение) и относительной деформацией. Он изменяется в зависимости от нагрузки. Запредельное поведение породы во время нагрузки описывается запредельным модулем. Значения запредельных параметров определены способами, которые были усовершенствованы в Центральном горном институте в Катовице. Один из методов расчета запредельного модуля — определение тангенса угла наклона линии, аппроксимирующей запредельную часть кривой “напряжение–деформация” (участок падения) образца породы [30].

Максимальные значения запредельного модуля, превышающие 70 000 МПа, являются характеристикой мелко- и среднезернистых песчаников ВКБ. Средние значения запредельного модуля вмещающих пород ВКБ лежат в диапазоне 4 400–24 700 МПа. Наибольшие средние значения данного параметра, превышающие 30 000 МПа, характеризуют мелкозернистые песчаники, которые считаются потенциально предрасположенными к толчкам.

Максимальные значения запредельного модуля углей, превышающие 43 000 МПа, характерны для углей в выработках, где происходят горные удары, и массив которых классифицируется как предрасположенный к горному удару. В условиях ВКБ средние значения запредельного модуля каменных углей лежат в диапазоне 5 958–14 395 МПа. Близость средних значений запредельного модуля к прочности на одноосное сжатие и их независимость от возраста угля является типичным случаем. По сравнению с вмещающими породами, уголь достигает больших значений запредельного модуля при меньших значениях прочности на сжатие.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВЛАГИ НА ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТЬ МАССИВА ПОРОД К ГОРНОМУ УДАРУ

Содержание влаги в породе каменноугольного периода ВКБ зависит от ее геологической структуры и условий притока воды. Необходимо различать долю водопоглощающих слоев в вертикальном профиле в различных областях ВКБ, а также толщину водонепроницаемых формаций в налегающих породах [31]. Породы, потенциально предрасположенные к толчкам, теряют геомеханическую прочность под влиянием воды, что повышает предрасположенность массива к горным ударам и увеличивает степень его угрозы в горных выработках.

Так как глубина добычи ВКБ увеличивается, наблюдается снижение водонесущей способности и водозапасающих свойств песчаников. Также необходимо отметить явление сжатия трещин в массиве, которое снижает его гидравлическую проницаемость. При увеличении глубины и изменении гидрогеологических параметров (пористости, проницаемости и способности к водоотведению) на глубоких горизонтах уменьшается приток воды. В гидрогеологически открытых областях ВКБ объем естественного притока воды в шахту в среднем составляет несколько десятков кубических метров в минуту. Значительно увеличивается глубина области активного водообмена. Значения геомеханических параметров пород в этих областях могут быть получены исследованием породы, поры которой частично заполнены водой, и породы, находящейся в капиллярно-насыщенном состоянии, в лабораторных условиях при использовании методов исследования водоотводящей способности пород [18].

В гидрогеологически закрытых областях, где формации каменноугольного периода залегают ниже мощного слоя непроницаемых или плохо проницаемых пород, естественный приток воды в шахты составляет от нескольких до нескольких сотен кубических метров в минуту. Значения геомеханических свойств пород в таких областях коррелируют с результатами лабораторных испытаний, проведенных в условиях сухого состояния, где водонасыщенное состояние породы близко к полностью осушенному массиву.

Для наиболее полной методики оценки предрасположенности массива пород ВКБ к горному удару рассмотрены геомеханические свойства пород в сложнапряженном, сухом и капиллярно-насыщенном состоянии. Получены следующие результаты:

— при увеличении водонасыщения образцов песчаника его угол внутреннего трения и сцепление уменьшаются;

— характеристики напряженно-деформированного состояния песчаников зависят от содержания влаги и действующего давления. Они описываются линейной функцией с высоким коэффициентом корреляции с учетом размера зерен (сухое состояние: $\sigma_1 - \sigma_3 = 4.821p + 73.390$, $r = 0.991$; капиллярно-насыщенное состояние: $\sigma_1 - \sigma_3 = 5.082p + 51.753$, $r = 0.993$).

Классическое трехосное нагружение пород ВКБ, выполненное при различных значениях содержания влаги, включая капиллярно-насыщенное, является основным методом оценки свойств породы, так как отражает содержание влаги в осушенной породе каменноугольного периода.

При одноосном сжатии породы в лабораторных условиях установлено, что вода способствует снижению геомеханических свойств. При насыщении водой UCS песчаников различных возрастов и тектонической структуры уменьшилась примерно на 10–60 %. В водонасыщенном состоянии прочность аргиллитов снизилась примерно на 50 %, а мадстоуны теряют 20–60 % своей прочности. Уменьшение прочности менее 10 % наблюдалось редко. Уголь из ВКБ при насыщении водой теряет 10–15 % прочности. Наибольшее снижение прочности пород на сжатие связано исключительно с капиллярным насыщением. Переход от капиллярно-насыщенного состояния к насыщенному привел к дальнейшему снижению прочности породы на сжатие.

Результаты многолетнего исследования песчаников ВКБ обеспечили основу для формулировки функциональной зависимости между прочностью на одноосное сжатие в капиллярно-насыщенном и в сухом состоянии (рис. 7).

Водонасыщение влияет как на прочность породы, так и на другие параметры, определяющие ее напряженно-деформированное состояние. Характеристики напряженно-деформированного состояния вмещающих пород ВКБ при одноосном сжатии, полученные на установках MTS-810 и MTS-815, показали изменение модуля Юнга и предельных параметров, которые наиболее значимы для расчета предрасположенности массивов к горным ударам (табл. 3 и рис. 8).

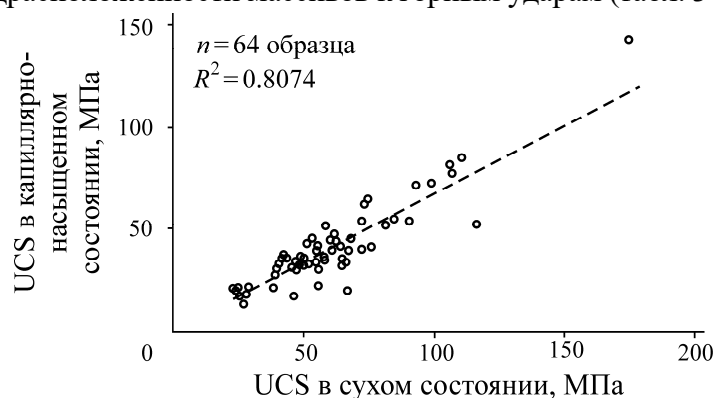


Рис. 7. Соотношение между средними значениями прочности на одноосное сжатие в капиллярно-насыщенном и сухом состоянии песчаников ВКБ ($UCS = 0.6610 + 1.2507$)

Учитывая текущую ситуацию в угледобывающей промышленности Польши после 2000 г., необходимо оценить влияние воды на закрытые затопленные шахты и соседние к ним действующие шахты. Важным вопросом является определение влияния повышения содержания влаги в породе из-за повторного насыщения массива водой на пограничных областях между действующими и закрытыми шахтами, так как это может быть использовано для классификации массивов как устойчивых или предрасположенных к горному удару.

ТАБЛИЦА 3. Изменение значений геомеханических свойств пород ВКБ под влиянием воды, МПа

Порода	Водонасыщенное состояние	Прочность на сжатие	Модуль Юнга	Запредельный модуль
Уголь (рис. 8а)	Сухое	19.9	2313	4228
	Капиллярно-насыщенное	14.7	1782	1702
Мелкозернистый песчаник (рис. 8б)	Сухое	79.8	10808	28862
	Капиллярно-насыщенное	48.8	7100	24844
Среднезернистый песчаник (формация мадстоун, Ожеше, табл. 1)	Сухое	60.5	8381	19341
	Капиллярно-насыщенное	40.3	8184	11801
Аргиллит (рис. 8в)	Сухое	43.3	8581	10924
	Капиллярно-насыщенное	37.0	5785	9153
Среднезернистый песчаник (рис. 8г)	Сухое	76.1	10341	12715
	Капиллярно-насыщенное	62.4	9696	15815
Среднезернистый песчаник (Верхнесилезская формация, Сиодлов, табл. 1)	Сухое	106.8	13233	50798
	Капиллярно-насыщенное	77.7	11369	41886

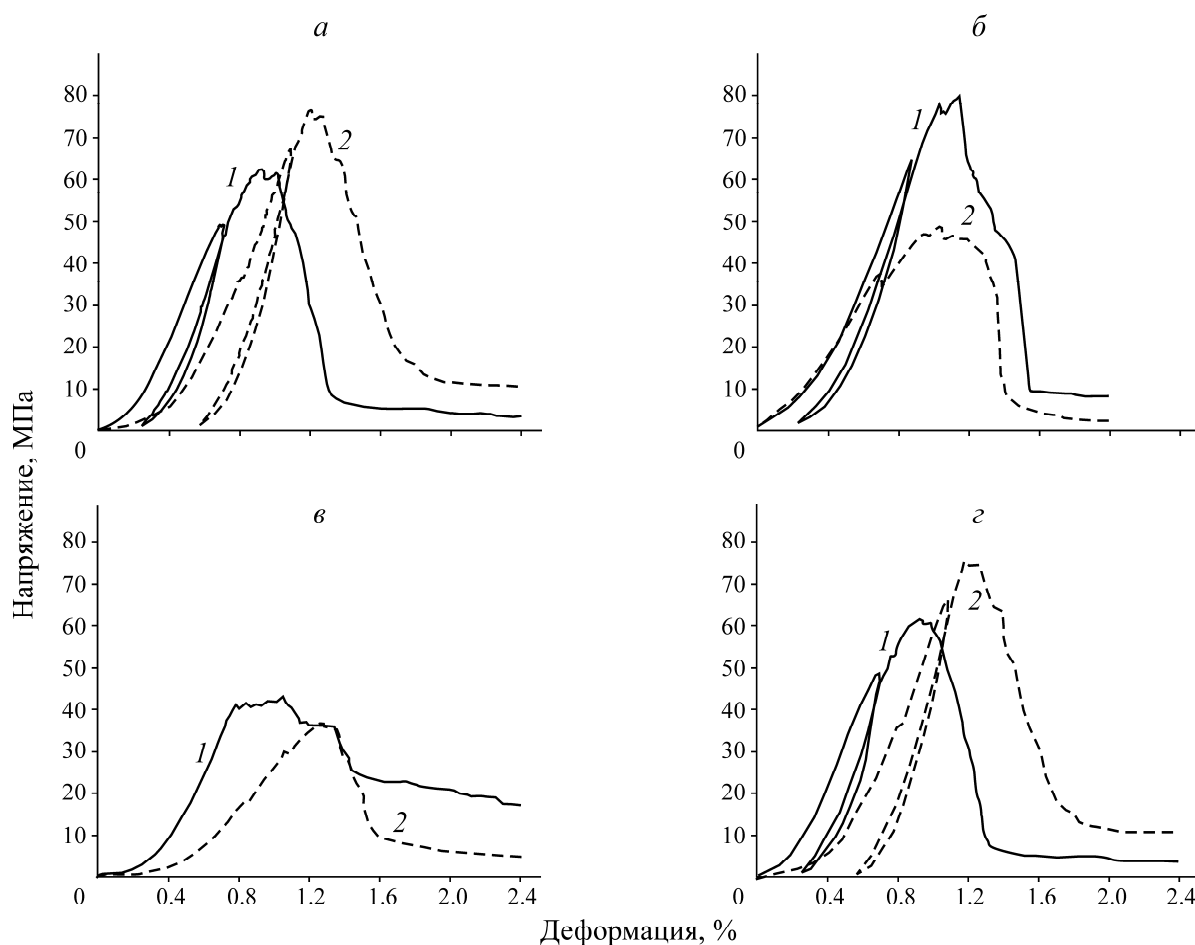


Рис. 8. Изменение характеристик напряженно-деформированного состояния образцов угля (а), мелкозернистого (б), аргиллита (в) и среднезернистого (г) песчаника при одноосном сжатии в сухом (1) и капиллярно-насыщенном (2) состоянии

Повышение предрасположенности массива к горному удару происходит из-за изменений свойств пород в результате повторного насыщения водой. Данные свойства отражаются модулем Юнга окружающих пород и запредельным модулем угля. Полученные значения использованы для оценки предрасположенности массива пород к горному удару в пограничных областях между действующими и закрытыми шахтами, а также для разработки геологической и геомеханической системы оценки предрасположенности массива пород к горному удару. Такая система применяется в Польше при добыче угля в ВКБ.

Для следующих условий рассмотрены примеры влияния водонасыщенных пород на их геомеханические свойства и на предрасположенность массива к горному удару:

- тектоническая структура — канал Бытом;
- в основе оценки предрасположенности массива пород к горному удару с интервалом 130 м в кровле пласта в формациях Сиодлов лежат испытания пород в сухом состоянии (табл. 4);
- фактическое содержание влаги в массиве соответствует частично насыщенному состоянию в области закрытой затопленной шахты;
- вывод о предрасположенности массива к горному удару в капиллярно-насыщенном состоянии выполнен на основе данных табл. 4 и 5;
- для оценки предрасположенности массива пород к горному удару учитывались значения UCS, определенные лабораторными методами, собственные эмпирические зависимости модуля Юнга и запредельного модуля UCS основных пород, залегающих в ВКБ, а также использовались данные исследования Ж. Кабижа [32].

ТАБЛИЦА 4. Спрогнозированные значения геомеханических параметров под влиянием воды на примере угольной шахты, расположенной в тектонической структуре канала Бытом в ВКБ, МПа

Порода	Прочность на одноосное сжатие			Модуль Юнга		Запредельный модуль угля	Модуль Юнга: порода, окружающая пласт 503
	Сухое состояние	минимальная	максимальная	минимальный	максимальный		
		Капиллярно-насыщенное состояние					
Песчаник	57.2	26.9	45.8	3765	5887	4509	4774
Мадстоун	57.0	53.9	56.1	6516	6747		
Аргиллит	54.9	27.5	—	3280	3628		
Угольный пласт 501	16.5	14.0	14.9	1415	1477		
Угольный пласт 503	16.7	14.2	15.0	1429	1484		

Изменения классификации массивов пород в зависимости от их предрасположенности к горному удару в действующей шахте в результате повторного водонасыщения, вызванного затоплением закрытой шахты, расположенной рядом с действующей, представлены в табл. 5. Расчеты по методу М. Буковской показали, что массив с интервалом залегания окружающих пласт пород 130 м перестал быть предрасположенным к горному удару в результате снижения прочности и упругости пород из-за повторного водонасыщения.

Можно заключить, что пограничные области между действующими и закрытыми затопленными шахтами характеризуются постоянно изменяющимся состоянием, при котором массив повторно насыщается водой. Данный массив подвергался воздействию воды и геомехани-

ческим нагрузкам. Если участки месторождения классифицируются “под угрозой горного удара”, то они исключаются из списка подходящих участков для добычи с целью предотвращения затопления. Угроза горного удара не позволяет проводить выработки и скважины для водоотведения.

ТАБЛИЦА 5. Прогноз предрасположенности массива в интервале 130 м вокруг пласта 503 к горному удару на участке, расположенном в канале Бытом

Массив пород	Показатель предрасположенности массива к горному удару W_{TG}^*	
	в сухом состоянии	в капиллярно-насыщенном состоянии
На 100 м выше и на 30 м ниже пласта 503	1.07 Массив предрасположен к горному удару	0.94 Массив не предрасположен к горному удару

* Определение значения W_{TG} и оценка предрасположенности массива к горному удару выполнена согласно [25]

ВЫВОДЫ

Для оценки содержания влаги в массиве горных пород проведены геомеханические испытания с помощью гидрогеологических методов. Результаты лабораторных испытаний массива в сухом состоянии можно использовать для осушенного массива с целью выявления его предрасположенности к горному удару в старых шахтах с глубокой осадкой. Чтобы оценить угрозу горного удара в областях, расположенных в районах затопленных закрытых шахт или на водонасыщенных участках новых месторождений, рекомендуется контролировать выполнение горных работ, учитывая возможное содержание влаги в массиве.

Предлагаемый метод отражает естественное состояние влаги в массиве пород с притоком воды или в массиве пород, насыщенных водой в результате напорного течения. Моделирование поведения влаги в массиве позволяет определить его состояние и механические свойства в областях, расположенных вдали от горных выработок. Геомеханические испытания способствуют развитию мер безопасности, применяемых в горной выработке.

Согласно анализу испытаний и лабораторному моделированию возможного поведения массива пород каменноугольного периода в польской части ВКБ, получены следующие выводы, учитывающие содержание влаги в массиве, которое изменяется из-за реструктуризации отрасли:

- предрасположенность массива пород к горному удару является одной из естественных причин его проявления в подземных выработках;
- для предотвращения естественных угроз и успешного выполнения всех стадий горнодобывающих работ необходимо иметь представление о свойствах пород и массива, а также о физических процессах, протекающих в породах под влиянием различных факторов.

Наиболее важными свойствами, которые должны быть проанализированы для оценки состояния массива пород и его предрасположенности к горному удару, являются: прочность на сжатие, упругость, предельное поведение пород, а также влияние содержания влаги. Для оценки данных свойств рекомендуется проводить испытания пород как в сухом, так и в капиллярно-насыщенном состоянии. Это позволяет классифицировать массив как предрасположенный или устойчивый к горному удару, а также определяет меры для предотвращения горного удара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bukowski P.** Predicting water hazard related to the flooding of hard coal mine workings. *Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Studia-Rozprawy-Monografie*, 2010, No. 882, Wydawnictwo GIG, Katowice. — 214 p.
2. **Rogoż M. and Posylek E.** Hydrogeological problems in Polish hard coal mines, Wydawnictwo GIG, 2000, Katowice. — 402 p.
3. **Rogoż M.** Mine hydrogeology with the basics of general hydrogeology, Wydawnictwo GIG, Katowice, 2004. — 683 p.
4. **Wilk Z., ed.** Hydrogeology of Polish mineral deposits and mining water problems. *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Kraków, 2003, Vol. 1. — 611 p.
5. **Rogoż M. and Posylek E.** Principles and criteria for the assessment of water hazard related to the liquidation of mines, *Przegląd Górniczy*, 1993, R 48/10. — P. 1–6.
6. **Bukowski P., Bukowska M., Rapantova N., Hemza, P., and Niedbalska K.** Secondary water saturation of a carboniferous rock mass in a abandoned mines as the cause behind the changes in geomechanical conditions and state of hazards in active mines of the upper silesian coal basin // *Khayurulina E., Wokelsdorfer Ch., Polyakova S., and Bogush A., Int. Mine Water Association Conf. Water — Technological and Ecological Challenges*. — Perm, Russia, 2019. — P. 3–10.
7. **Szczepański A., Adamczyk A. F., Haladus A., and Zdechlik R.** About the purposefulness of changes to the drainage systems of closed hard coal mines. *Mat. VII Konf. nt.: Problemy geologii i ekologii w górnictwie podziemnym*, *Prace Naukowe GIG*, 1998, Vol. 24. — P. 215–229.
8. **Younger P. L., Wolkersdorfer Ch., eds.** Mining impacts of the fresh water environment: Technical and managerial guidelines for catchment scale management. *Mine Water and the Environment*, *J. Int. Mine Water Association (IMWA)*, 2004, Supl. I, Vol. 23.
9. **Li Z. and Reddish D. J.** The effect of groundwater recharge on broken rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2004, Vol. 41 (Suppl. 1). — P. 280–285. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2004.03.054.
10. **Vásárhelyi B. and Ván P.** Influence of water content on the strength of rock, *Eng. Geology*, 2006, Vol. 84, No. 1–2. — P. 70–74. DOI: 10.1016/j.enggeo.2005.11.011.
11. **Yilmaz I.** Influence of water content on the strength and deformability of gypsum, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2010, Vol. 47, No. 2. — P. 342–347. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.09.002.
12. **Yao Q., Li X., Zhou J., Ju M., Chong Z., and Zhao B.** Experimental study of strength characteristics of coal specimens after water intrusion, *Arabian J. of Geosciences*, 2015, Vol. 8, Issue 9. — P. 6779–6789, DOI 10.1007/s12517-014-1764-5.
13. **Shi X., Cai W., Meng Y., Li G., Wen K., and Zhang Y.** Weakening laws of rock uniaxial compressive strength with consideration of water content and rock porosity, *Arabian J. Geosciences*, 2016, Vol. 9, Issue 51, Article 369. DOI: 10.1007/s12517-016-2426-6.
14. **Majeed Y. and Abu Bakar M. Z.** Water saturation influences on engineering properties of select sedimentary rocks of Pakistan, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54, Issue 6. — P. 914–930.
15. **Özdemir E. and Sarici D. E.** Combined effect of loading rate and water content on mechanical behavior of natural stones, *J. Min. Sci.*, 2018, Vol. 54. — P. 931–937.
16. **Dubiński J. and Konopko W.** Rockbursts — assessment, Prediction, Combating (in Polish), Wydawnictwo GIG, Katowice, 2000.
17. **Lurka A., Mutke G., Stec K., Kurzeja, J., Chodacki J., Siata R., et al.** Seismic hazard, in *Kabiesz, J., ed. 2018, Annual Report on the basic natural and technical hazards in hard coal mining*, Wydawnictwo GIG, 2018, Katowice.

18. **Bukowski P.** Evaluation of water hazard in hard coal mines in changing conditions of functioning of mining industry in Upper Silesian Coal Basin — USCBB (Poland), Arch. Min. Sci., 2015, Vol. 60, Issue 2. — P. 455–475.
19. **Salamon M. G. D.** Stability, instability and design of pillar workings, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1970, Vol. 7. — P. 613–631.
20. **He J., Gong S., Dou L., Li J., and Zhiqiang M.** Rock burst assessment and prediction by dynamic and static stress analysis based on micro-seismic monitoring, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2017, Vol. 93. — P. 46–53.
21. **Quan Jiang., Guo-shao Su., Xia-ting Feng., Jie Cui., Peng-zhi Pan., and Jian-qing Jiang.** Observation of rock fragment ejection in post-failure response, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2015, Vol. 74. — P. 30–37.
22. **Bukowska M.** Post-critical mechanical properties of sedimentary rocks in the Upper Silesian Coal Basin (Poland), Arch. Min. Sci., 2015, Vol. 60, No. 2. — P. 517–534.
23. **Kabiesz J.** Rock burst hazard, in Kabiesz J. (ed). Annual Report on the basic natural and technical hazards in hard coal mining, Wydawnictwo GIG, 2019, Katowice.
24. **Bula Z. and Kotas A., eds.** Geological atlas of the upper silesia coal basin, Państwowy Instytut Geologiczny, 1994, Warszawa.
25. **Bukowska M.** Susceptibility of the rock mass to rock bursts — geological and geomechanical assessment methods, Wydawnictwo GIG, 2012, Katowice.
26. **Smółka J.** Stress-and-strain characteristics of failure of coals and rocks in uniaxial compression tests. Symp. Nauk.-Tech. Tapania '94, Wydawnictwo GIG, 1994, Katowice. — P. 53–61.
27. **Małkowski P. and Niedbalski Z.** A comprehensive geomechanical method for the assessment of rock-burst hazards in underground mining, Int. J. Min. Sci. Technol., 2020, Vol. 30. — P. 345–355.
28. **Szeczówka Z.** Changes in certain mechanical properties of coal caused by water in the context of preventing rock bursts, Komunikat GIG, 1972, No. 568, Katowice.
29. **Bukowska M., Sanetra U., and Wadas M.** Zonation of deposits of hard coals of different porosity in Upper Silesian Coal Basin, Gospodarka Surowcami Mineralnymi — Mineral Resources Management, 2016, Vol. 32, Issue 1. — P. 5–24.
30. **Ulusay R. and Hudson J. A., eds.** The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006, Commission on testing methods ISRM, 2007, Ankara, Turkey.
31. **Różkowski A., ed.** Hydrogeochemical environment of productive Carboniferous of the Upper Silesia Coal Basin, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, 2004. — 174 p.
32. **Kabiesz J. and Konopko W.** Rock burst prevention through saturating coal seams with water, Prace Naukowe GIG, 1996, Seria Instrukcje, No. 2, Katowice.

Поступила в редакцию 17/XII 2020

После доработки 15/VII 2021

Принята к публикации 10/IX 2021