В. С. ЗАБУРДЯЕВ

МЕТАН УГОЛЬНЫХ ШАХТ



«Инфра-Инженерия»

УДК 622.2/.333
ББК 33.31
З-12

Р е ц е н з е н т ы :
доктор технических наук *Малинникова Ольга Николаевна*;
доктор технических наук *Подображин Сергей Николаевич*

Забурдяев, В. С.
З-12 Метан угольных шахт : монография / В. С. Забурдяев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 276 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0904-9

Изучены вопросы структуры макромолекул углей и метана, природные свойства углей, ресурсы метана углегазовых месторождений России, метаноносности пластов угля, влияние глубины залегания угольных пластов на их метаносодержание и газоотдачу в горные выработки и дегазационные скважины. Исследована метанообильность угольных шахт и выемочных полей, методы прогноза интенсивности выделения метана в шахтах. Приведены фактические данные о метаноносности угольных пластов, метанообильности выемочных участков, интенсивности извлечения метана из пластов угля средствами дегазации с учетом петрографического состава углей. Изучены газодинамические процессы выделения метана в горные выработки газообильных шахт и их дегазационные системы. Исследована метановая опасность при подземном способе разработки метаносодержащих пластов угля, фрикционных искрениях и накоплениях метана в выработанных пространствах.

Для научных и инженерно-технических работников угольной промышленности, а также студентов горного профиля.

УДК 622.2/.333
ББК 33.31

ISBN 978-5-9729-0904-9

© Забурдяев В. С., 2022
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. МЕТАНОНОСНОСТЬ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ 5
1.1. Структура макромолекул углей и метана 5
1.2. Ресурсы угольного метана 9
1.3. Влияние глубины залегания угольных пластов на метаноносность 12
1.4. Природные свойства углей 20

2. ПРИРОДНЫЕ ГАЗЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ШАХТ 25
2.1. Газы призабойного пространства выработок 25
2.2. Влияние компонентов фюзинита и витринита на пористость углей и содержание газов 29

3. МЕТАНООБИЛЬНОСТЬ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 36
3.1. Интенсивность выделения метана в шахтах 36
3.2. Метанообильность выемочных участков 42
3.3. Прогноз метанообильности выемочных участков 49

4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ 53
4.1. Метановыделение и добыча угля в очистном забое 53
4.2. Дегазация угольных пластов при высоких скоростях подвигания забоя 60
4.3. Метановыделение при отработке пласта 52 (шахта «Котинская», АО «СУЭК-Кузбасс») 65

5. ВЛИЯНИЕ ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО СОСТАВА УГЛЕЙ НА ГАЗООТДАЧУ ПЛАСТОВ В СКВАЖИНЫ 74
5.1. Вещественный состав углей 74
5.2. Влияние вещественного состава углей на газоотдачу пластов в скважины 76

6. ВЫДЕЛЕНИЕ МЕТАНА ИЗ ОТБИТОГО В ОЧИСТНОМ ЗАБОЕ УГЛЯ 80

7. ИЗВЛЕЧЕНИЕ МЕТАНА ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА ... 86
7.1. Выработанное пространство очистного забоя ... 86
7.2. Извлечение метана подземными и наземными скважинами ... 90
7.3. Газоваяя опасность в угольных шахтах ... 91
7.4. Эффективность схем управления газовыделением на угольных шахтах ... 92
7.5. Условия и эффективность применения подземных схем дегазации сближенных угольных пластов ... 100
7.6. Эффективность дегазации сближенных угольных пластов и выработанного пространства вертикальными скважинами ... 103

8. РЕСУРСЫ МЕТАНА В ОТРАБОТАННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ... 110
8.1. Ресурсы метана в отработанных пространствах лавами по падению-восстанию пласта ... 110
8.2. Ресурсы метана в отработанных пространствах лавами по простиранию пласта ... 113

9. МЕТАНОВАЯ ОПАСНОСТЬ НА ПОДЗЕМНЫХ РАБОТАХ ... 117
9.1. Влияние интенсивности добычи угля на метановыделение выемочных участков ... 117
9.2. Оценка вероятности взрывов метановоздушных смесей в шахтах ... 122

10. ФОРМИРОВАНИЕ ВЗРЫВООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ ... 127
10.1. Горнотехнические условия разработки угольных пластов ... 127
10.2. Условия формирования взрывоопасных по газу и пыли ситуаций в шахтах ... 131
10.3. Фрикционное искрение – воспламенитель метанопылевоздушной смеси ... 137
10.4. Нижний предел взрываемости взвешенной в рудничном воздухе угольной пыли ... 141

11. ВАКУУМНЫЕ ДЕГАЗАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ... 148
11.1. Расчет параметров дегазационной системы ... 148
11.2. Проектирование дегазационных систем на протяженных шахтных полях ... 157

12. НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ БАЗА ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 167

13. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕГЛАМЕНТА ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ШАХТНОГО МЕТАНА В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ ВЫСОКОГАЗОНОСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ 173

14. ПРОБЛЕМЫ МЕТАНООБИЛЬНЫХ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 179

15. АПРОБАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ НА ЗАРУБЕЖНЫХ ШАХТАХ 184
15.1. Шахты КНР 184
15.2. Шахты Карагандинского и Донецкого бассейнов 191
15.3. Шахты Мозамбика 203

16. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 217

17. МЕТАНОВАЯ ТРАВМООПАСНОСТЬ НА РОССИЙСКИХ ШАХТАХ 222

18. БЕЗОПАСНОСТЬ ПОДЗЕМНОЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ ПО ГАЗОВОМУ ФАКТОРУ 230
18.1. Дегазация углепородного массива 230
18.2. Параметры интенсивного извлечения метана из угольных пластов 240
18.3. Динамика извлечения метана из угольных пластов 245
18.4. Технологические решения
по снижению газовой опасности в шахтах 255

ВЫВОДЫ 264

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 266

1. МЕТАНОНОСНОСТЬ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1.1. Структура макромолекул углей и метана

Уголь – высокомолекулярное вещество[*)]. Структура ячейки макромолекулы угля примерно одинакова и отличается в ряду метаморфизма лишь числом циклогексановых (бензольных) и циклопентановых (нафтеновых) ароматических колец и «бахромой» (боковыми цепочками). Ячейки макромолекул угля соединены между собой «бахромой» из алифатических, нафтеноалифатических, кислород- и азотсодержащих групп. Кислородсодержащие группы присутствуют в виде неактивного кислорода (С–О–С), гидроксильных (–ОН), карбонильных (–СО), карбоксильных (–СООН) и метоксильных ($-OCH_3$) функциональных соединений [1].

При содержании углерода в угле около 92 % весь кислород (4 %) присутствует в неактивной и очень устойчивой форме. В ряду метаморфизма с уменьшением выхода летучих веществ потери кислородсодержащих групп происходят в обратном порядке, т. е. сначала метоксильные, затем карбоксильные и т. д.

Макромолекула угля средней стадии метаморфизма содержит более 600 атомов углерода, 500 атомов водорода и 70 атомов кислорода. Кроме них в незначительном количестве присутствуют в связанном состоянии атомы азота и серы, причем содержание азота остается относительно постоянным и составляет для каменных углей около 1 %, а для антрацитов – до 2,5 %. Атомы азота в каменном угле находятся почти полностью в гетероциклической структуре, в основном в циклогексановой. Атомов серы, присутствующих в гетероциклической структуре, приблизительно в два раза больше, чем в боковых цепочках, при этом они находятся преимущественно в циклопентановой структуре. Рост макромолекул угля в процессе углефикации, т. е. с возрастанием степени метаморфизма, происходит в основном в результате увеличения числа углерод-углеродных связей ароматических колец при параллельной потере кислородсодержащих групп.

Макромолекула угля не плоская, и структурные ячейки ее, тем более боковые цепочки, не подобны друг другу. Для структуры малометаморфизованных углей с большим выходом летучих веществ характерно наличие длинных гибких боковых цепочек, связывающих углеродные ячейки, и появление большой внутренней поверхности из-за значительных промежутков между ячейками (ядрами макромолекулы). Благодаря этому и наличию кислородсодержащих

[*)] Использованы научные труды Н. Л. Глинки «Общая химия», К. С. Краснова «Физическая химия», Г. Грея «Электроны и химическая связь», Л. и М. Физер «Органическая химия», т. 1 и др.

групп малометаморфизованные угли способны адсорбировать большое количество влаги.

Для структуры малометаморфизованных углей с большим выходом летучих веществ характерно наличие длинных гибких боковых цепочек, связывающих углеродные ячейки, и появление большой внутренней поверхности из-за значительных промежутков между ячейками (ядрами макромолекулы). Благодаря этому и наличию кислородсодержащих групп малометаморфизованные угли способны адсорбировать большое количество влаги.

Ядра макромолекулы, представленные в основном бензольными кольцами, обладают наибольшей прочностью, поскольку длина гибридизованной углерод-углеродной связи в бензольном кольце составляет 0,14 нм (1.4 Å). Окружающие их боковые цепочки относительно бензольных колец характеризуются меньшей устойчивостью. Длина углерод-углеродной связи в алифатических и ароматически-алифатических цепочках составляет в среднем 0,154 нм. Структура ядра макромолекулы, принципиально одинаковая у всех каменных углей и отличающаяся лишь числом циклогексановых и циклопентановых ароматических колец, в процессе механического разрушения почти не изменяется. Количество и состав боковых цепочек в большой степени обусловливают все многообразие углей, поскольку длины связей между атомами больше и, естественно, меньше энергии их разрыва, поэтому процесс разрушения коснется в первую очередь боковых цепочек и межслоевых связей, преимущественно π-связей [1].

Отечественные и зарубежные учёные установили, что средние энергии связей С–С и С–Н в алифатических соединениях в зависимости от влияния силовых полей ядер и электронов соседних атомов изменяются соответственно в пределах 248–264 и 357–416 кДж/моль, в нафтеноалифатических соединениях эти связи выше на 42–59 кДж/моль. Энергии связей кислородсодержащих групп составляют: С-О – 315–344; О-О до 403; О-Н – 420–466 кДж/моль. При этом длины связей С-О колеблются в пределах 0,142–0,146 нм в зависимости от типа соединений О-О – 0,12 и О-Н – 0,096 нм. Длины связей С–С имеют большие величины и в среднем составляют 0,149–0,154 нм, причем минимальная (0,149 нм) – в боковой цепочке, где присутствует атом азота, а максимальная (0,154 нм) – в алифатических и ароматически-алифатических цепочках. Средняя энергия связи между ароматическими макромолекулами в слое приблизительно пропорциональна числу углеродных атомов в нем. Учитывая, что на каждый ароматический атом углерода на такую энергию связи приходится около 6,3 кДж/моль (по данным Д. В. Ван-Кравелена и Ж. Шуера), энергия связи между слоями, построенными из 35–40 ароматических углеродных атомов, в коксующихся углях составит 210–252 кДж/моль. При этом необходимо учитывать, что силы связи между молекулами коксующихся углей слабее, чем углей других стадий метаморфизма. Наименьшую устойчивость имеют π-связи (~150 кДж/моль).

Исходя из величин энергии связей надо полагать, что при разрушении углей в первую очередь разрываются межслоевые π-π связи и связи с меньшей

энергией взаимодействия (С-С и С-О). Именно эти разорванные связи и их число, с нашей точки зрения, в момент разрушения (при прочих равных условиях) определяют многие механические, физико-механические и физико-химические свойства углей, например, пылеобразующую способность, смачиваемость и эффективность пылеподавления, антракосиликозную опасность, коксуемость и др. Эти свойства в большей степени зависят от структуры внешнего электронного слоя атомов или группы атомов и лишь в меньшей – от строения предшествующих (внутренних) электронных слоев.

В месте разрыва связей появляются неспаренные электроны (свободные или активные радикалы, ионы и ион-радикалы) атомов или соединений. Неспаренные электроны с течением времени присоединяют другие электроны в зависимости от сродства к электрону атома. Так, в обычном состоянии атом углерода – один из главных представителей в макромолекуле угля – имеет на внешней электронной оболочке (слое) два неспаренных электрона ($2p^2$)* и одну свободную р-орбиталь. Атом кислорода также обладает двумя неспаренными электронами ($2p^4$), но не имеет свободной р-орбитали. Атомы кислорода и серы ($3p^4$), присутствующие в макромолекуле угля, не имеют свободных орбиталей. Благодаря наличию неспаренных электронов каждый из них может образовывать не более двух общих электронных пар (ковалентных связей). Атом азота на внешней электронной оболочке содержит три неспаренных электрона ($2p^3$) и, следовательно, может участвовать в образовании трех ковалентных связей. Присутствие в макромолекуле угля атомов азота увеличивает энергию разрыва связей, а атомов серы, наоборот, снижает. Ковалентные связи могут возникнуть и за счет спаренных электронов, имеющихся на внешней электронной оболочке атома и принадлежащих только одному атому, например, кислорода или азота. Два электрона, принадлежащих только одному атому, образуют неподеленную электронную пару с активными радикалами и участвуют в образовании ковалентной связи с другим атомом, имеющим свободную орбиталь во внешней электронной оболочке, например атомом углерода или ионом водорода [1].

Молекула метана CH_4 построена в виде тетраэдра с атомом углерода в центре куба, а атом водорода – в его противолежащих вершинах. Для образования сигма-молекулярных орбиталей (σ-МО) используются все валентные орбитали атома углерода – 2s, $2p_x$, $2p_y$ и $2p_z$, а также перекрывание атомной 2s-орбитали углерода с 1s-орбиталями четырех атомов водорода. Такому перекрыванию отвечает линейная комбинация атомных ls-орбиталей ($ls_a + ls_b + 1s_c + 1s_d$). В результате получаем две МО: связывающую и разрыхляющую. Связывающая область $2p_z$-орбитали перекрывается с ls_a- и ls_b-, а разрыхляющая – с $1s_c$- и $1s_d$-орбиталями. Соответствующая линейная комбинация имеет вид ($ls_a + ls_b - 1s_c - 1s_d$). Орбитали углерода $2p_x$ и $2p_y$ перекрываются с четырьями 1s-орбиталями точно также, как и $2p_z$.

Интервалы перекрывания орбиталей σ_x, σ_y и σ_z равны между собой, поэтому эти три МО являются энергетически вырожденными. Средняя энергия связи С–Н составляет 420 кДж/моль, расстояние С-Н в молекуле CH_4 равно 1,093Å [1–3]. Угол между связями Н–С–Н в молекуле метана состав-

* $2p^2$ – второй слой (или уровень) с двумя р-электронами.

ляет 109°28'. Объединяя атомные орбитали 2s, $2p_x$, $2p_y$ и $2p_z$, получим четыре эквивалентные орбитали, локализованные на атоме углерода гибридные sp^3-орбитали. Каждая такая гибридная sp^3-орбиталь на 1/4 имеет s- и на 3/4 – p-характер.

Для зажигания метана необходимо затратить определенное количество теплоты. Минимальная энергия воспламенения метана зависит от температуры нагрева. Легче всего метановоздушная смесь воспламеняется с объемной долей метана 7,5–8 %. Термическая диссоциация и горение метана начинаются лишь после поглощения теплоты в количестве более 93 кДж/моль. Метан диссоциирует на CH_3–H и C–H, причем весьма заметно при температуре 600 °C. Теплота сгорания метана составляет 893,8 кДж/моль (55,8 кДж/г, 23,5 кДж/мл). Увеличение объемной доли метана до 14–16 % приводит к полному самогашению и прекращению взрыва вследствие недостатка кислорода.

В молекуле метана (CH_4) имеется восемь валентных электронов – четыре электрона атома углерода $(2s^22p^2)^*$ и четыре электрона атомов водорода (1s), которые образуют четыре σ-связи: связывающие $\sigma_s^{св}$,$\sigma_x^{св}$, $\sigma_y^{св}$ и $\sigma_z^{св}$ и разрыхляющие $\sigma_s^{разр}$, $\sigma_x^{разр}$, $\sigma_y^{разр}$ и $\sigma_z^{разр}$. Интервалы перекрывания орбиталей σ_x σ_y и σ_z равны и все электроны спарены [2, 3]. Молекула CH_4 не имеет дипольного момента и мало растворима в воде (до 3 %). Фотоэлектронная спектроскопия показывает, что два первых потенциала ионизации (способность удерживать свой электрон) равны 12,51 и 22, 39 эВ. Величина энергии связи метана с углем колеблется в пределах 12,6-20,9 кДж/моль. Для антрацитов эта величина составляет 25,1–29,3 кДж/моль [4–6]. Минимальная энергия $E_{min}^{вс}$ воспламенения метана зависит от температуры окружающей среды t^0 (см. рис. 1.1).

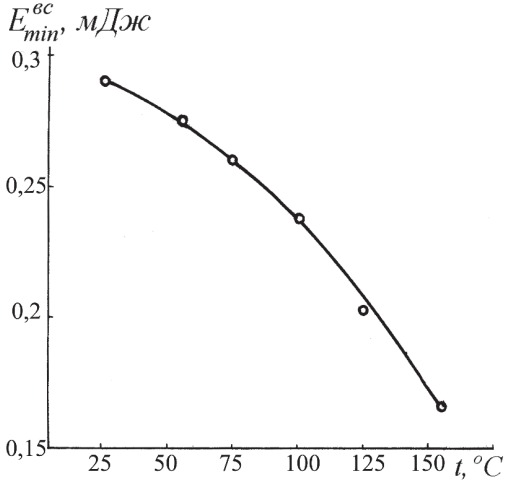


Рис. 1.1 – Зависимость минимальной энергии воспламенения метана от температуры окружающей среды

* $2s^22p^2$ – второй слой с двумя s- и p-электронами.

1.2. Ресурсы угольного метана

Российские угольные бассейны являются крупной отечественной сырьевой базой для энергетической, металлургической и коксохимической промышленности. В Кузбассе, Воркуте и других геолого-промышленных районах РФ находятся 80 % всех газообильных шахт. Месторождения РФ располагают крупнейшими в мире запасами каменного угля и являются самыми метаноносными: 8,3 кг метана в 1 тонне угля, против 7,4 кг/т в Великобритании, 6,7 кг/т в КНР, 5,0 кг/т в США и 3,6 кг/т в ФРГ.

Незначительная глубина залегания поверхности зоны метановых газов и сорбционный потенциал углей обусловили высокую газоносность углепородных толщ месторождений Воркуты и Кузбасса, где метаноносность угольных пластов достигает 25–28 $м^3$/т, абсолютная газообильность наиболее газовых шахт – 150 $м^3$/мин, выемочных участков – 80–90 $м^3$/мин. В течение года в угольных шахтах РФ выделяется 1,3–1,6 млрд $м^3$ метана, 96,5 % объема которого выбрасывается в атмосферу Земли.

Многолетними исследованиями, проведенными в различных угольных бассейнах России и других стран СНГ, изучены вопросы генезиса газов угольных месторождений, их химический состав, условия миграции газов в угленосных отложениях, установлены основные физико-химические факторы, обусловливающие коллекторские свойства углей и пород, а также решены многие вопросы выделения газов в горные выработки шахт [7–13]. Результаты труда ученых и геологов нашли отражение в нормативно-методическом документе «Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах».

Угленосные отложения в угольных бассейнах и месторождениях России, так же как и в углегазовых месторождениях других стран мира, характеризуются преимущественно неравномерным распределением газоносности. Угленосность и степень метаморфизованности углей крайне изменчивы. Восточный Донбасс отличается тем, что в нем наблюдается довольно резкое изменение метаморфизма углей в направлении с севера на юг. Здесь распространены угли марок Д и Г, встречаются слабометаморфизованные антрациты и преобладают угли средних стадий метаморфизма. С ростом метаморфизма углей возрастает газоносность угольных пластов. Угольные пласты, сложенные углями марки Г, имеют максимальные значения газоносности до 12–15 $м^3$/т с.б.м., а пласты с марками углей К-ОС – до 15–22 $м^3$/т с.б.м. [9, 14–16].

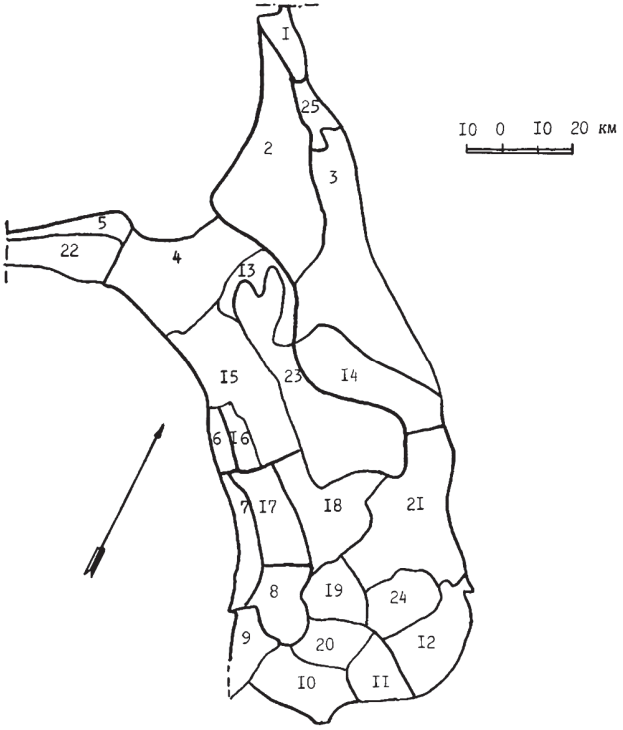
В регионах залегания высокометаморфизованных антрацитов угленосная толща практически не содержит метана в пределах глубин до 1600 м.

Метаноносность угольных пластов зависит от геологических факторов, в числе которых основными являются история геологического развития бассейнов, тектоническое строение месторождения, угленосность отложений, петрографический состав углей, литологический состав и коллекторские свойства вмещающих пород, а также характер покровных отложений, гидрогеологические условия, многолетняя мерзлота и пр. Практическое значение из них на

объемы содержания метана в угленосных отложениях настоящего времени имеют тектоника месторождения, угленосность отложений, петрографический состав углей и коллекторские свойства пород.

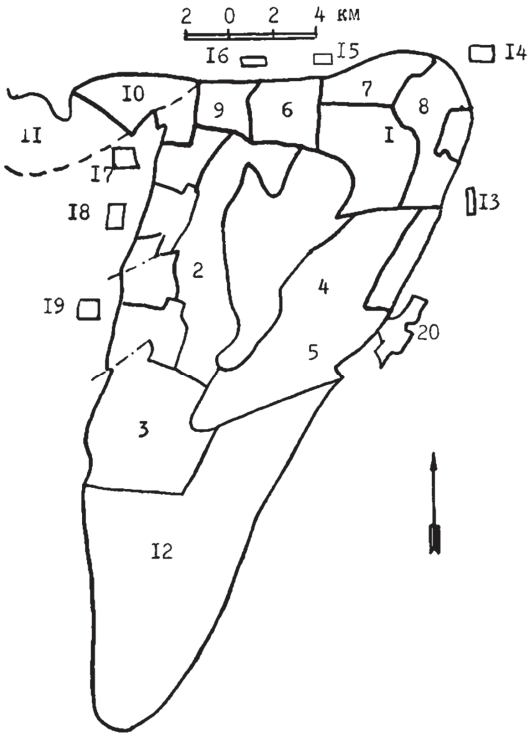
Влияние петрографического состава углей на метаноносность угольных пластов проявляется в газовых, жирных и коксовых углях, метаноемкость которых увеличивается по мере повышения содержания в них фюзинита. Петрографический состав длиннопламенных, тощих и более метаморфизованных углей на их метаноносность оказывает менее заметное влияние. Повышенное содержание микрокомпонентов группы витринита способствует увеличению числа трещин в угле и повышению его газопроницаемости.

Влияние глубины залегания пластов угля и марки углей на фактическую метаноносность пластов Кузнецкого бассейна при различной глубине верхней границы метановых газов. Природная метаноносность углей увеличивается от длиннопламенных до коксующихся и снижается от коксующихся до антрацитов. При этом с глубиной залегания пластов метаноносность углей всех марок возрастает и характерно для геолого-промышленных районов наиболее газоносных месторождений Кузбасса и Воркуты (рис. 1.2 и 1.3).



1 – Анжерский;
2 – Кемеровский;
3 – Крапивинский;
4 – Титовский;
5 – Завьяловский;
6 – Бачатский;
7 – Прокопьевско-Киселевский;
8 – Араличевский;
9 – Бургуно-Чумышский;
10 – Кондомский;
11 – Мрасский;
12 – Томусинский;
13 – Плотниковский;
14 – Салтымаковский;
15 – Ленский;
16 – Беловский;
17 – Ускатский;
18 – Ерунаковский;
19 – Байдаевский;
20 – Осиновский;
21 – Терсинский;
22 – Доронинский;
23 – Центральный;
24 – Тутуясский;
25 – Барзасский

Рис. 1.2 – Схема расположения геолого-промышленных районов Кузбасса



1 – Северная;
2 – Комсомольская;
3 – Заполярная;
4 – Воркутинская;
5 – Южная (закрыта);
6 – Центральная (закрыта);
7 – Юр-Шор (закрыта);
8 – Аяч-Яга;
9 – Промышленная (закрыта);
10 – Октябрьская;
11 – Воргашорская;
12 – № 33 (в стадии строительства);
13 – пос. Октябрьский;
14 – пос. Северный;
15 – пос. Юр-Шор;
16 – пос. Промышленный;
17 – пос. Воргашор;
18 – пос. Комсомольский;
19 – пос. Заполярный;
20 – г. Воркута

Рис. 1.3 – Схема расположения шахтных полей АО «Воркутауголь», поселков и г. Воркуты

В публикациях, посвященных подсчету ресурсов метана в различных угольных бассейнах России [2, 7], отмечены большие расхождения в данных, характеризующих объемы метана в угольных месторождениях, что обусловлено различными подходами при определении общих ресурсов и промышленных запасов метана.

В угленосных отложениях Кузнецкого бассейна, как наиболее перспективного по ресурсам углеводородных газов, содержится в угольных пластах – 6,5, угольных пропластках – 0,7, во вмещающих породах – 19,5 трлн м^3 метана [7], что сомнительно.

Промышленные ресурсы метана угольных месторождений устанавливаются подсчетом запасов угля и метана, как попутного полезного ископаемого, при геолого-экономической оценке запасов на основе данных о метаноносности углей и пород. Они могут быть оценены также по метаноносности углей на основе прогноза метановыделений из угольных пластов с учетом долевого их участия в газовом балансе выемочного участка и шахты или по данным ретроспективного анализа добычи угля и выделений метана в угольных шахтах [14].

Границами подсчета реально извлекаемых запасов метана принимаются контуры, в пределах которых извлечение метана при отработке угольных пластов технологически необходимо, главным образом, по условиям безопасности ведения горных работ по газовому фактору. Местоположение границ устанавливается в соответствии с рекомендациями нормативных документов. Все запасы метана, в том числе и в пластах с забалансовыми запасами угля и в нерабочих пластах, подсчитанные в контурах возможного извлечения метана, относятся к балансовым. Кроме того, в контурах оцениваются прогнозные ресурсы метана в нерабочих тонких пластах и пропластках угля. Общие геологические ресурсы метана в пределах шахтного поля (блока, пласта, горизонта) определяют путем перемножения запасов угля в нем на среднюю метаноносность угля и на коэффициент сухой беззольной массы.

Метод прогноза ресурсов метана, основанный на метаноносности отрабатываемого угольного пласта, прогнозе метанообильности участков и долевом их участии в метанообильности шахты, базируется ретроспективном методе прогноза ресурсов метана на полях угольных шахт, анализе объемов выделения метана в горные выработки и дегазационные сети шахт, а также на учете производительности шахт (годовой добыче угля), промышленных запасах угля и времени их отработки. Эти методы оценки реально возможных для извлечения объемов шахтного метана дают весьма скромные значения. Так, ресурсы метана в запасах углей категории $A+B+C_1$ в РФ оценены в 260 млрд $м^3$, а в промышленных запасах углей – 160 млрд $м^3$ метана [9, 10].

Прогноз ресурсов метана и объемов его выделения в горные выработки и дегазационные сети может быть достаточно достоверным при наличии сведений и исходных данных о порядке отработки угольных пластов в свите, календарном плане ввода и вывода выемочных участков, добыче угля, системах разработки, способах проветривания горных выработок и дегазации источников метановыделения, а также исчерпывающих данных о стратиграфических разрезах углевмещающей толщи, мощности и метаноносности угольных пластов, зольности и влажности углей и др. информации, предусмотренной требованиями отраслевых нормативных документов.

Необходимость оценки реальных ресурсов угольного метана в недрах России новыми методами, а также достоверность прогноза объемов его выделения в угольных шахтах и извлечения средствами дегазации очевидны. При этом весьма важным является привязка упомянутых показателей к реальным объектам, причем в численных значениях, а не в удельных, например, в миллионах метров кубических метана на квадратный километр площади.

1.3. Влияние глубины залегания угольных пластов на метаноносность

К числу основных факторов, влияющих на содержание метана в угольных пластах, относится глубина их залегания от поверхности месторождения [1–6]. Многолетние исследования газоносности угольных месторождений на территории бывш. СССР путем отбора угольных кернов при геологической разведке

и исследования их газосодержания позволили установить как по площади, так и по глубине угольного месторождения наличие и количественные величины состава газов, разработать инструкцию по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород [10], а в последствии составить карты газоугольных месторождений и шахтных полей, обосновать зависимости содержания газов с глубиной залегания пластов угля.

Анализ данных об изменении газоносности с глубиной залегания пластов угля в Кузнецком бассейне свидетельствует о значительном разбросе экспериментально определенных ее значений от средних величин после математической обработки исходных данных керногазового опробования, газообильности шахт, газовых съемок, метаноемкости углей и природного давления газов. Так, большой разброс фактических данных от средних значений газоносности пластов угля отмечен в Анжеро-Судженской брахисинклинали, Кемеровской синклинали, Горбунихинской и Редаковской антиклиналях, Байдаевской брахисинклинали и Щелканской синклинали. Более того, существенные отличия наблюдаются в градиентах нарастания газоносности угольных пластов с глубиной их залегания. Например, после аппроксимации исходных данных $x = f(H)$ линейным уравнением в интервале глубины 100–600 м на участке Никитинском Северном этот градиент составил 4,5 $м^3/т$ на 100 м вертикальной глубины, а на полях шахт 1 и 2 Инского шахтоуправления – только 2,4 $м^3/т$.

Приведенные материалы определения численных величин газоносности и градиента ее изменения с глубиной залегания пластов угля свидетельствуют о целесообразности дальнейших исследований этого вопроса в угленосных районах и на конкретных шахтных полях, что позволит максимально приблизиться к фактической природной газоносности угольных пластов на проектируемых глубинах их разработки. Такие исследования в последние годы проведены нами на шахтных полях Кондомского, Осиновского, Байдаевского, Томь-Усинского и Мрасского районов Кузбасса.

Анализ результатов прямого опробования угольных пластов и вмещающих пород на содержание в них метана, полученных Осинниковской геологоразведочной партией (ГРП) с помощью керногазонаборников свидетельствуют о следующем.

Участок поля шахты «Алардинская» расположен в южной части Кондомского геолого-экономического района Кузбасса. Падение угольных пластов моноклинальное под углом $10–15^0$, тектоническое строение простое, по сложности геологического строения участок относится к I группе. Из 7 основных пластов угля (пласты 1, 3–3^а, 6, 7, 9–9^а, 11^а–11, 11–12) и 17 одноименных, имеющих самостоятельное значение, пласт 1 относится к маркам ОС и КС, а пласты 3–3^а и 3-к маркам КС и ТС. Мощность пластов 1 и 3–3^а составляет 1,13–2,34 м и 4,41–6,14 м соответственно, а угольных пачек – 1,13–2,14 и 3,57–5,74 м.

Пласт 1 является верхним пластом кемеровской свиты. Строение его преимущественно умеренно сложное, он содержит 1, реже 2–3 породных прослоя суммарной мощностью 0,03–0,35 м. Пласт относительно выдержанный

по мощности и строению, мощность его составляет в среднем 1,58 м. Уголь пласта коксующийся, поэтому пласт 1 является наиболее перспективным для развития добычи угля на площади прирезки к шахте «Алардинская».

Пласт 3–$3^{а}$–$3^{б}$ является одним из основных пластов. Его мощность достигает 8,2 м. Широко распространенное расщепление пласта 3–$3^{а}$–$3^{б}$ характеризуется резким увеличением мощности разделяющих прослоев, в результате единый компактный (слитный) пласт расслаивается на отдельные, далеко отстоящие друг от друга угольные пачки. Линия расщепления ориентирована по падению пласта. Пласт $3^{б}$ промышленного значения не имеет.

Пласт 3–$3^{а}$ при компактном (слитном) строении имеет среднюю мощность 5,25 м. Строение его сложное, содержит от 2 до 10 породных прослоев общей мощностью от 0,2 до 1,35 м. На участке пласт распространен до горизонта – 200 м, далее с глубиной он дополнительно расщепляется на самостоятельные пласты 3 и $3^{а}$. Расщепление характеризуется направленностью по простиранию с запада на восток.

Петрографический состав углей в пределах участка прирезки до горизонта –300 м изменяется незначительно. Уголь пласта 1 с содержанием витринита 73–78 % относится к клареновому типу, а пласта 3–$3^{а}$ и 3 с содержанием витринита 53–60 % – к дюрено-клареновому типу. Содержание фюзинизированного вещества изменяется со стратиграфической глубиной от 12–24 % в углях пласта 1 до 39–71 % – пласта $11^{а}$–11.

Выход летучих веществ уменьшается со стратиграфической глубиной от 18,5 % (среднее значение) в угле пласта 1 до 13,0 % – пласта 12. Ступень глубинного метаморфизма составляет 2,5 % на каждые 100 м, или 0,2–0,3 % на каждые 100 м по падению пласта.

Метан является основным компонентом пластовых газов: в 65 % случаев отбора через скважины проб угля (всего 26 проб) содержание метана составляло 99,1–99,8 % и только в 7 % случаев (2 пробы угля) – 94,3 и 94,9 %, в остальных пробах – 96,1–98,8 % метана. Содержание диоксида углерода в керновых пробах угля колебалось от 0,1 до 2 %, азота – от 0,1 до 5,6 %. Критическая глубина появления внезапных выбросов угля и газа равна 344–695 м (в среднем 514 м) от земной поверхности, что соответствует горизонту +100 м.

Сопоставление усредненных данных о газоносности семи основных угольных пластов, установленной Осиновской ГРП (рисунок 1.4), с данными по пластам 1 и 3–$3^{а}$, а также с шахтными данными по пласту 3–$3^{а}$ свидетельствует: 1) о хорошем совпадении последних на восточной части поля и слабом – на западном его участке; 2) данные ГРП по пластам 1 и 3–$3^{а}$, отрабатываемым в первую очередь, практически все располагаются ниже усредненной линии $x = f(H_{абс})$. В связи с этим построены зависимости как по пласту 1 (рисунок 1.5), так и по пласту 3–$3^{а}$ (рисунок 1.6), которые описываются, соответственно, следующими уравнениями (в $м^3/т$ с.б.м.)

$$x_I = 15{,}2 + 0{,}017H_a \qquad (1.1)$$

и

$$x_{3\text{-}3^{а}} = 16{,}0 + 0{,}0133H_a. \qquad (1.2)$$

Влияние глубины залегания пластов 1 и 3–3^{а} на газоносность оценено также по абсолютной отметке поверхности (h, м) и по глубине (H, м) от земной поверхности. Оба эти фактора учтены в общей для пластов 1 и 3–3^{а} зависимости

$$x = 12 + 0{,}012\ (h \pm H_a), \qquad (1.3)$$

где x – метаноносность пласта, м^3/т с.б.м;

H_a – абсолютная отметка угольного пласта в месте отбора пробы керногазонаборником, м.

В уравнении (1.3) знак «плюс» принимается при залегании пласта угля ниже горизонта ± 0 м, а знак «минус» – выше горизонта ±0 м.

Уравнение (1.3) можно записать также в следующем виде

$$x = 12 + 0{,}012H. \qquad (1.4)$$

В недрах горного отвода шахт «Осинниковская», «Тайжина», «Капитальная» и «Высокая» (Осиновский район) действующих шахт «Осинниковская» и «Тайжина», закрывающихся шахт «Капитальная» и «Высокая» залегают газоносные пласты каменного угля Елбанской (Е), Кандалепской (К) и Полкаштинской (П) свит, а также пласты бурого угля.

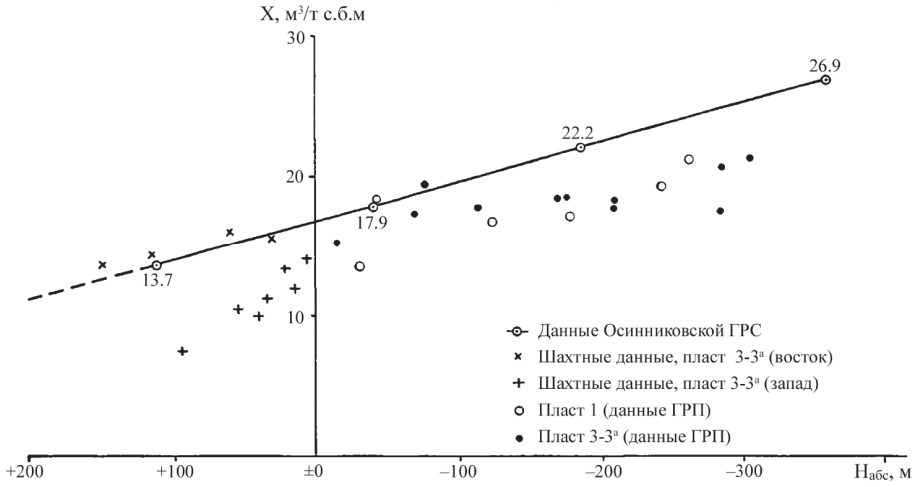


Рис. 1.4 – Сопоставление газоносности пластов 1 и 3–3^{а} с усредненными ее данными по пластам 1–12

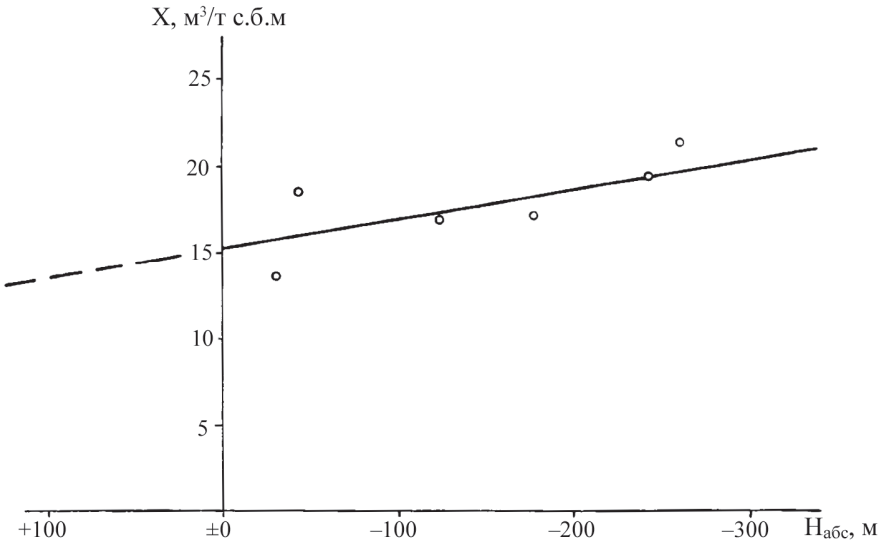
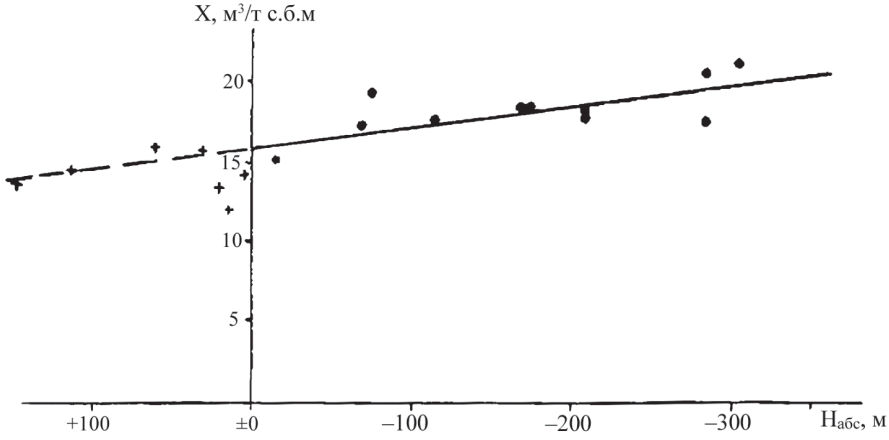


Рис. 1.5 – Зависимость газоносности пласта 1 от глубины его залегания (абсолютные отметки)



«•» – данные Осиновской ГРП; «+» – шахтные данные

Рис. 1.6 – Зависимость газоносности пласта 3–3[а] от глубины его залегания (абсолютные отметки)

От верхней границы метановых газов газоносность пластов каменного угля увеличивается с глубиной их залегания и достигает 20 м^3/т в интервале глубин 600–700 м от земной поверхности.

$$x = к_г(H - H_0), \quad (1.5)$$

где $к_г = 0{,}0265$.

Учитывая процентное содержание газов в углях, залегающих на горном отводе шахт «Осинниковская» и «Капитальная», метаноносность угольных пластов в природных условиях по аналогии с формулой (1.5) определена зависимостью

$$x_м = 0{,}0242\ (H - H_0). \quad (1.6)$$

Продуктивные отложения полей шахт *«Абашевская» и «Зыряновская» (Байдаевский район)* сложены осадками ускатской свиты ильинской подсерии, включающей в себя угольные пласты с 1 по 25, и ленинской свиты ерунаковской подсерии, включающей пласты с 26^а по 38. Обе подсерии относятся к кольчугинской серии верхнепермского возраста.

Ускатская свита содержит 12 рабочих пластов угля и большое число тонких невыдержанных пропластков. Общая угленосность свиты – 4,9 %, рабочая – 2,4 %. В ленинской свите заключено 13 рабочих пластов и значительное число тонких пропластков. Общая угленосность свиты – 4,2 %, рабочая – 3,8 %.

Поля шахт «Абашевская» и «Зыряновская» расположены в восточном крыле Байдаевской брахисинклинали и по тектоническому строению относятся к наиболее простым структурам. Отличительной особенностью является развитие дополнительной волнистости, поперечной к оси синклинали, что делает гипсометрию пласта довольно сложной. По геологическому строению поле шахты относится к I группе сложности.

Мощность угольных пластов в контурах подсчета запасов изменяется в пределах от 0,60 до 3,67 м. Наиболее мощные пласты угля содержатся в ленинской свите, т. е. в верхней половине стратиграфического разреза. Пласты с малыми мощностями (0,7–1,5 м) преобладают в нижележащей ускатской свите.

Из 25 пластов угля рабочей мощности 10 пластов (пласты 38, 37, 36, 35, 33, 32, 31, 30, 29^а и 29^в) имели на 01.01.2001 г. нулевой остаток балансовых запасов, а остальные 15 пластов (от пласта 27^а до пласта 5) имеют горно-геологические условия отработки в целом благоприятные (углы падения 0–18°).

Рабочие пласты 16 и 14 отнесены к марке Ж и являются опасными по взрываемости угольной пыли, угрожаемыми по горным ударам с глубины 150 м и по внезапным выбросам угля и газа с глубины 360 м. Пласты не склонны к самовозгоранию. Шахта «Абашевская» является сверхкатегорной по метану.

Верхняя граница метановой зоны в различных частях горного отвода расположена на глубине 60–150 м от земной поверхности. Ниже этой границы газоносность угольных пластов увеличивается от 4,3 м^3/т на гор. +210 м до 15–17 м^3/т на гор. ±0 и до 24 м^3/т на гор. –300 м.

Изменение газоносности угольных пластов с глубиной их залегания с учетом установленной зависимости для ограниченных глубин показано на рисунке 1.7.

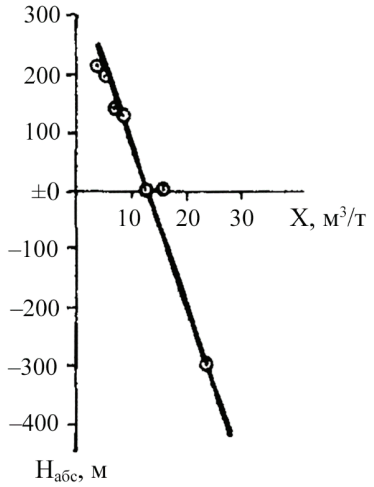


Рис. 1.7 – Изменение газоносности (X) угольных пластов с глубиной (H) их залегания в условиях шахты «Зыряновская»

Высокая газоносность угольных пластов и наличие многочисленных подрабатываемых и надрабатываемых сближенных пластов обусловливают достаточно высокую интенсивность метановыделения в выработки выемочных участков и шахты в целом.

Газоносность рабочих пластов 14 и 16 и сближенных с ними подработанных и надработанных пластов угля определялась по фактическим данным геологоразведочных партий по газовому опробованию и представлена зависимостью

$$x = 0{,}0386H^{I} + 4{,}3, \qquad (1.7)$$

где H^{I} – глубина залегания угольных пластов от верхней границы метановых газов, м.

Имеющийся фондовый и литературный материал и шахтные данные об изменении метаноносности «x» угольных пластов на поле шахты «Распадская» от глубины H их залегания были собраны и обобщены, на основе которых построен график $x = f(H)$, представленный на рисунке 1.8–1.9. Из рисунков просматривается линейная зависимость метаноносности пласта глубиной 230 м.

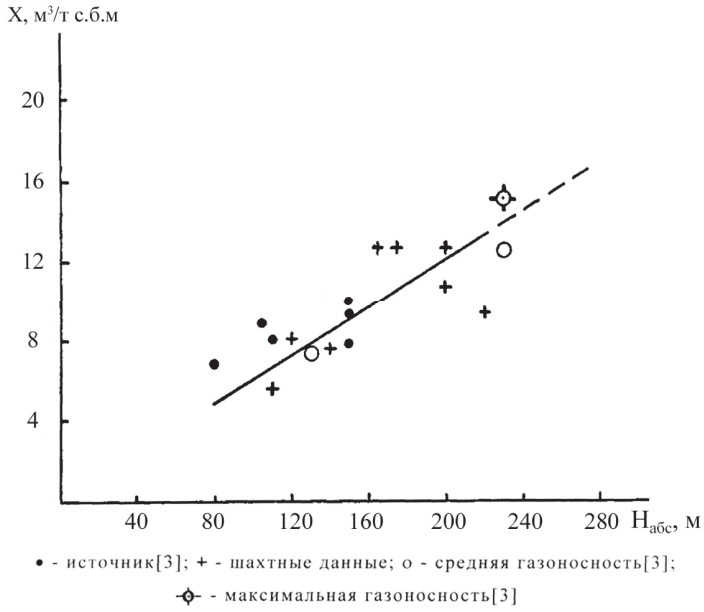


Рис. 1.8 – Изменение газоносности угольных пластов до глубины 230 м (шахта «Распадская»)

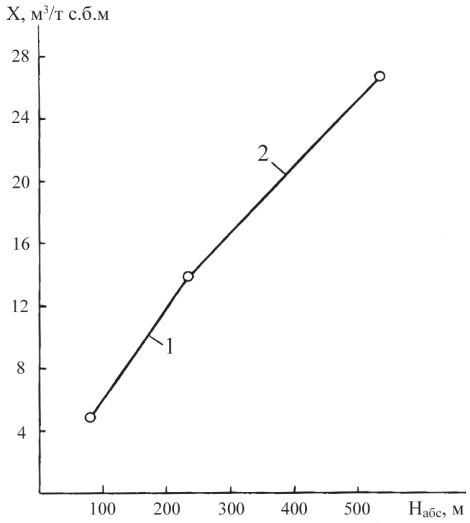


Рис. 1.9 – Изменение газоносности угольных пластов с глубиной залегания на поле шахты «Распадская»:
1 – до глубины 230 м; 2 – на глубине 230–550 м

В интервале глубин 80–230 м от земной поверхности метаноносность угольных пластов на поле шахты «Распадская» изменяется пропорционально глубине залегания пласта

$$x = 0{,}06\ H, \tag{1.8}$$

а на глубинах от 230 до 550 м – по зависимости

$$x = 13{,}8 + 0{,}042\ (H - H^*), \tag{1.9}$$

где $H^* = 230$ м.

Зависимости (1.1)–(1.9), описывающие изменение газоносности угольных пластов с глубиной их залегания, использованы ниже для прогноза метаноносности пластов угля, метанообильности очистных забоев, определения показателей газоотдачи угольных массивов в подготовительные выработки и дегазационные скважины.

При этом следует подчеркнуть, что показатели метаноносности пластов угля в связи с глубиной их залегания предопределяются численной величиной коэффициентов при глубине, которые характеризуют физико-химические свойства углей, их петрографический и вещественный состав. Отклонения от линейной зависимости в сторону уменьшения величины метаноносности, измеренной при геологической разведке угольных месторождений и пластов угля, обусловлены потерями части объемов метана при отборе кернов угля на более глубоких горизонтах, где давление газов превышает давление столба промывочной жидкости.

1.4. Природные свойства углей

Из многообразия природных свойств углей исследованы их внутренние петрографические разности, которые оказывают влияние на газоносность и метановыделение в угольных шахтах [1].

Основные петрографические разности представлены группами витринита (V_t), семивитринита (S_v), фюзинита (F) и лейптинита (L), относительное содержание которых изменяется в широких пределах в зависимости от типа углей. Например, в Кузбассе в Анжерском геолого-промышленном районе при выходе из пласта летучих веществ (V^{daf}) от 12 до 18 % содержание витринита составляет, соответственно, 45–60 %, фюзинита – 24–35 %, семивитринита – 4–12 %; в Беловском районе при V^{daf} от 26 до 41 %: V_t = 93–89 %, F = 5–7 %, S_v = 2–3 %; в Осиновском районе при V^{daf} от 28 до 50 %: V_t = 90–82 %, F = = 8–12 %, S_v = 2,5–7,5 %.

Содержание микрокомпонентов группы лейптинита в среднепластовых пробах углей балахонской и кольчугинской серий обычно менее 3 %, тарбаганской – менее 8 %. Исключением являются пласты Кемеровского и Ленинского районов, где доля участия лейптинита в некоторых образцах матовых однородных углей достигает 10–15 % и более: например, пласты Владимировский (1,8–22,4 %), Волковский (1,1–21 %), Кемеровский (1,5–16,5 %), Поджуринский (6,3–15,4 %), Емельяновский (4,4–15,0 %), Байкаимский (2,8–11,2 %).

В Печорском и Кизеловском бассейнах содержание лейптинита изменяется, соответственно, от 3 до 5–7 % и от 12,4 до 36 % и в среднем составляет от 5,0 до 28,6 %, а в барзасских углях Кузбасса достигает 40 %. При этом имеет место общая качественная зависимость увеличения содержания микрокомпонентов группы V_t и уменьшения содержания микрокомпонентов группы F с увеличением выхода летучих веществ (рис. 1.10).

С другой стороны, повышение содержания витринита снижает сорбционную способность угля, а фюзинита повышает ее. Возможно поэтому более метаморфизованные угли обладают повышенной сорбционной способностью и имеют более высокую метаноносность и метаноотдачу (исключая суперантрациты), поскольку сорбционные свойства углей в основном определяются разной степенью упорядоченности структуры отдельных микрокомпонентов и в целом всей массы угля.

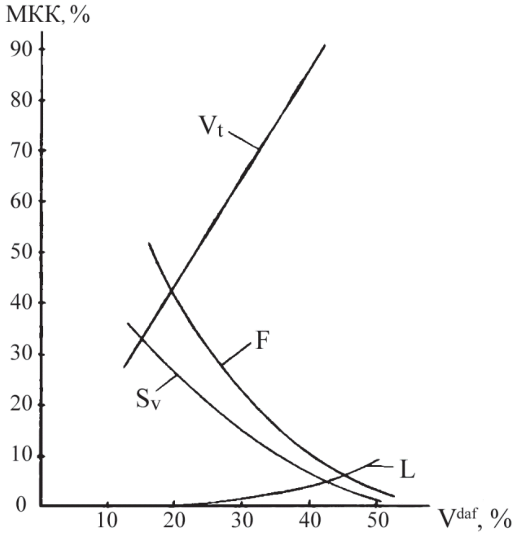


Рис. 1.10 – Изменение петрографического состава углей на шахтах Кузбасса от выхода летучих веществ:
V_t, F, S_v, L – соответственно, содержание микрокомпонентов групп витринита, фюзинита, семивитринита и лейптинита

Из многообразия угольных шахтопластов Кузбасса (491) для оценки влияния петрографических микрокомпонентов на метаноносность учитывались те пласты, у которых наблюдались значительные изменения компонентов, например, групп фюзинита и минеральных примесей. Содержание микрокомпонентов витринита и лейптинита не претерпевали существенных колебаний, а затем, наоборот, происходили изменения компонентов группы витринита и лейптинита при относительном постоянстве компонентов фюзинита и минеральных примесей (М, %). При этом относительное постоянство отношения выхода ле-