Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института, том XXVI, вып. I, 1952 г.

ПРОГНОЗ ПРОРЫВОВ ВОД ИЗ ПОЧВЫ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Канд. техн. наук А. И. Морозов

Разработка буроугольных месторождений Подмосковного бассейна связана с серьезными трудностями, обусловленными неустойчивостью вмещающих пород и сильной их обводненностью. Обводненность является причиной своеобразных явлений, называемых прорывами. Прорыв — это выброс воды или плывуна в горные выработки. По местоположению и происхождению прорывы могут быть разделены на два типа: 1) прорывы из почвы и 2) прорывы из кровли.

Природа и механика явления прорывов из почвы и кровли различны. Прорыв из кровли может иметь место во всех случаях, когда при обрушении кровли в подготовительной выработке или очистном забое надугольный водоносный горизонт попадает в зону обрушения независимо от того, является ли он напорным или ненапорным. Наличие напорных вод увеличивает интенсивность прорыва и делает его более опасным по своим последствиям.

Для возникновения прорыва из почвы горной выработки наличие подугольного водоносного горизонта является необходимым, но еще недостаточным условием. Прорыв может возникнуть лишь тогда, когда подугольные воды обладают напором, превышающим уровень почвы выработки, и отделены от последней водонепроницаемым слоем небольшой мощности.

Механизм прорыва из почвы сводится к разрушению пласта подугольной глины, преграждающего доступ вод подугольного водоносного горизонта в подготовительные или очистные выработки. Основной активной силой, разрушающей толщу подугольных глин, является гидростатическое давление подугольных вод.

Практика показывает, что конечная стадия деформации характеризуется появлением в пласте подугольной глины трещин на всю мощность пласта. По этим трещинам напорная вода проникает в горные выработки, размывает их в каналы, способные пропустить значительные количества воды. При этом вода обычно выносит значительное количество взвешенных частиц — песчаных, глинистых и т. п. Прорывы из почвы могут возникать как в подготовительных выработках, так и в очистных забоях.

Как показывает практика разработки обводненных месторождений Подмосковного бассейна, интенсивность прорывов зависит в основном от величины напора подугольных вод. При напорах порядка 30 *м* и более прорывы имеют обычно катастрофический характер и могут вывести из строя не только отдельные участки, но и шахту в целом.

Об этом свидетельствует ряд примеров. Так, 23 сентября 1939 г. в 4-м восточном штреке шахты № 49 Поплевинской произошел прорыв подугольных вод с первоначальным дебитом около 350 $м^3$ *час*. В результате прорыва шахта была затоплена.

Другой случай произошел на шахте № 2 Селищенской 30 октября 1937 г. В ходке к водосборнику шириной 2,2 *м*, отделенном от водоносного горизонта толщей глины в 3 *м*, произошел прорыв подугольных вод, обладавших напором 78,5 *м*. Вода прорвалась в средней части не закрепленной бетоном заходки. Первоначальный дебит составлял около 800 $м^3/час$. Шахта была выведена из строя.

При малой мощности подугольных глин прорыву может предшествовать выпирание глин под действием давления подугольных вод. Так, например, на шахте № 7 Щекинской при проходке 21 бортового штрека лавы № 6, в 50 *м* от главного откаточного штрека, после обнажения глинистой почвы бортового штрека началось интенсивное выпирание подугольной глины. Мощность глины была около 0,8 *м*. В течение 4 часов в штреке образовался глинистый бугор, который затем потрескался, и через трещины в штрек прорвалась вода. Первоначальный дебит прорыва был порядка 100 $м^3/час$. Прорыв произошел при напоре, равном 10 *м*.

Рассмотренные примеры показывают, что прорывы воды и плывуна в горные выработки причиняют серьезный ущерб горной промышленности. Ухудшая условия разработки, они приводят к снижению производительности труда рабочих и увеличению себестоимости угля.

Борьба с прорывами из почвы может быть эффективной только тогда, когда правильно оценивается опасность прорывов воды и плывуна в горные выработки по материалам геологической разведки. Прогноз прорывов позволит своевременно принять необходимые меры к их предупреждению. В существующей литературе мы не находим какого-либо метода, позволяющего сделать прогноз прорывов. Ниже нами рассматривается один из возможных методов прогноза. Он дает возможность приближенно, но с достаточной для практических целей точностью, решить ряд задач, связанных с разработкой обводненных месторождений. Такими задачами являются.

1) определение величины гидростатического давления, при котором могут быть прорывы подугольных вод в конкретных геологических условиях;

2) установление минимальной мощности защитных толщ, обеспечивающих безопасное ведение горных работ на участках, имеющих напорные водоносные горизонты;

3) оценка степени необходимого снижения напора подугольных вод для предупреждения прорывов.

Приближенное решение этих задач может быть получено на основе гипотезы предельных пролетов проф. В. Д. Слесарева[1].

Для простоты рассмотрим решение перечисленных задач на примере штрекообразной выработки неограниченно большой длины. Выделим элемент выработки с подстилающими и покрывающими ее породами, равный единице длины. Допустим, что пласт подугольной глины в пределах выделенного элемента представляет собой балку с заделанными концами. Он будет подвергаться действию двух, противо-

[1] В. Д. Слесарев, Механика горных пород и рудничное крепление, Углетехиздат, 1948.

положно направленных сил: гидростатического давления напорных подугольных вод и собственного веса (рис. 1).

Согласно гипотезе предельных пролетов пласт подугольной глины будет разбит трещинами на всю мощность, исчерпает свою несущую способность и будет разрушен при ширине выработки, равной третьему предельному полету, определяемому из выражения:

$$\frac{\gamma h l^2}{12 \sigma_p h} = \frac{h}{2}, \qquad (1)$$

где γ — объемный вес породы, $т/м^3$;
h — мощность пласта, $м$;
l — ширина выработки, $м$;
σ_p — временное сопротивление породы на растяжение, $т/м^2$.

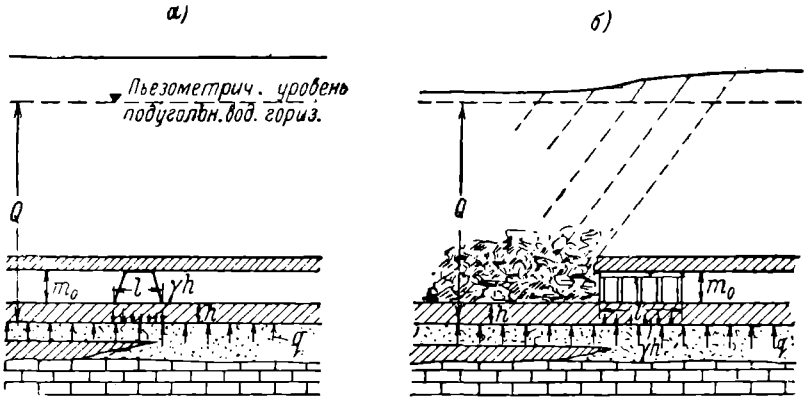


Рис. 1. Схема действия сил при прорыве из почвы горных выработок: *а* — в подготовительной выработке; *б*— в очистном забое

m_0 — мощность угольного пласта, h — мощность пласта, подугольной глины, l — ширина выработки, Q — полный напор, q — гидростатическое давление, при котором происходит прорыв, γh — давление, обусловленное весом пласта подугольной глины.

Для случая, когда активной силой является гидростатическое давление, а не сила тяжести, и силы противоположны по направлению, выражение (1) примет вид:

$$\frac{(q - \gamma h) l^2}{12 \sigma_p h} = \frac{h}{2}, \qquad (2)$$

где q — гидростатическое давление на почву пласта подугольных глин, при котором происходит прорыв, $т/м^2$;
h — мощность пласта подугольных глин, отделяющих напорный водоносный горизонт от почвы горной выработки, $м$.

Остальные величины имеют прежнее значение.

Решив уравнение (2) относительно q, получим величину гидростатического давления, при котором происходит прорыв воды или плывуна в горную выработку:

$$q = 6 \sigma_p \frac{h^2}{l^2} + \gamma h. \qquad (3)$$

Формула (3) выражает зависимость между величиной напора подугольных вод q и мощностью пласта подугольных глин h. Первый

член правой части выражения (3) представляет собой часть гидростатического давления подугольных вод, расходуемого на разрушение пласта глины, а второй — на преодоление его веса в пределах выработки. Из выражения (3) также следует, что с увеличением мощности пласта подугольных глин, при прочих равных условиях, опасность прорыва подугольных вод уменьшается, а с увеличением пролета выработки — возрастает. Таким образом, уравнение (3), выражающее зависимость $q = f(h)$, позволяет сделать прогноз о возможности прорывов из почвы на данном шахтном поле на основании разведочных и лабораторных данных — h, $\sigma_р$ и γ при заданной ширине выработки l и учесть полученные результаты при проектировании.

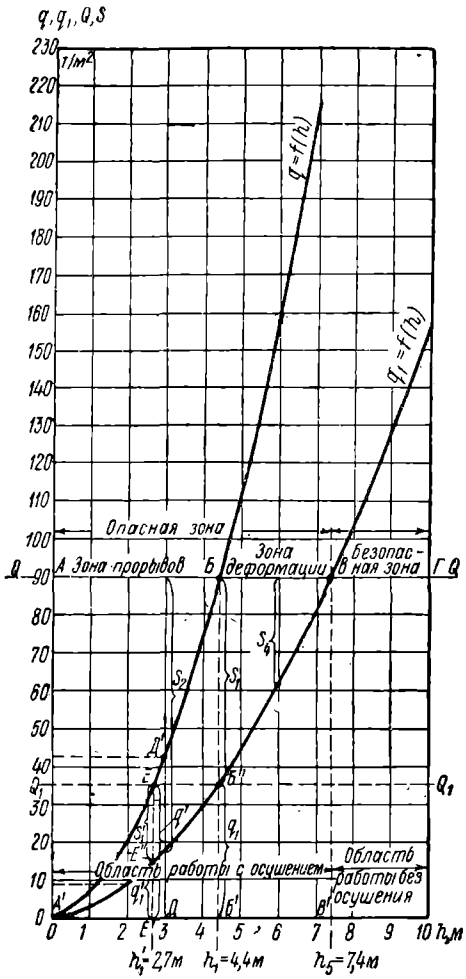


Рис. 2. График прогноза прорывов из почвы горных выработок

Зависимость $q = f(h)$ дает кривую, которая характеризует конечный момент разрушения пласта подугольных глин под действием гидростатического давления. Эту кривую мы называем *кривой возможных прорывов* (рис. 2).

Предотвратить прорыв в горные выработки и сделать безопасным производство подготовительных и очистных работ можно путем временного снижения гидростатического давления подугольных вод на некоторую величину S.

Для определения величины S предварительно рассмотрим вопрос об устойчивом состоянии почвы. Пласт подугольной глины независимо от его мощности может поглощать некоторую часть гидростатического напора, оставаясь устойчивым. Величина напора, поглощаемого пластом подугольной глины, приближенно может быть определена, аналогично предыдущему, из условий первого предельного пролета. Первый предельный пролет есть ширина выработки, при которой в почве не возникает растягивающих напряжений, наиболее опасных для ее равновесия.

В рассматриваемом случае первый предельный пролет определится из выражения:

$$\frac{(q_1 - \gamma h) l^2}{12 \sigma_р \; h} = \frac{h}{6}, \qquad (4)$$

где q_1 — гидростатическое давление, воспринимаемое пластом подугольной глины, без деформации его, $т/м^2$;

h — мощность пласта подугольной глины, $м$;

l — ширина выработки, $м$;

$\sigma_р$ — временное сопротивление глины на растяжение, $т/м^2$;

γ — объемный вес подугольной глины, $т/м^3$.

Решая уравнение (4) относительно q_1, найдем гидростатическое давление, поглощаемое пластом глины в почве выработки без деформации самого пласта:

$$q_1 = 2\sigma_р \frac{h^2}{l^2} + \gamma h. \tag{5}$$

Уравнение (5), выражающее зависимость $q_1 = f(h)$, дает кривую, которую мы называем кривой прочного состояния почвы (рис. 2). Из выражения (5) видно, что с увеличением мощности пласта подугольной глины h возрастает и величина погашаемого гидростатического давления при заданных значениях l, $\sigma_р$ и γ. Следует заметить, что с возрастанием пролета выработки l первый член уравнения (5) стремится к нулю. При $l = \infty$ получим:

$$q_1 = \gamma h. \tag{6}$$

Последний случай имеет место при открытых работах.

Для дальнейших рассуждений введем еще одну величину — полное гидростатическое давление подугольных вод на шахтном поле или отдельном его участке Q. Эта величина для каждого шахтного поля всегда известна по данным гидрогеологических разведочных работ.

Найденные зависимости $q = f(h)$ и $q_1 = f(h)$, взятые раздельно, дают возможность получить ответы лишь на отдельные вопросы. Взятые совместно, они связывают между собой величины q, q_1, Q и h при заданных значениях l, $\sigma_р$ и γ и дают простой и наглядный метод прогноза прорывов из почвы, т. е. решают задачу в целом. Поэтому совмещенный график кривой прорывов $q = f(h)$ и кривой прочного состояния почвы $q_1 = f(h)$ можно назвать графиком прогноза прорывов из почвы горных выработок. Имея эти кривые и заданное значение полного гидростатического давления Q, можно определить:

1) мощность пласта подугольной глины h, при которой возможен прорыв вод из почвы выработки при заданном значении Q;

2) величину гидростатического давления q, при котором в данной точке с мощностью подугольных глин h возможен прорыв вод из почвы выработки;

3) величину гидростатического давления q_1, поглощаемую пластом подугольной глины без деформации пласта;

4) необходимую величину снижения гидростатического давления подугольных вод S (для обеспечения безопасного ведения горных работ) при заданном Q;

5) минимальную мощность защитной толщи подугольных глин, обеспечивающую безопасное ведение горных работ без снижения напора вод подугольного водоносного горизонта;

6) область работы с осушением и без осушения.

Определение искомых величин рассмотрим на конкретном примере. Пользуясь уравнениями (3) и (5), построим кривые $q = f(h)$ и $q_1 = f(h)$ графика прогнозов для следующих условий: ширина

выработки $l = 2{,}7$ *м*, временное сопротивление глин разрыву $\sigma_р = 5$ *т/м*^{2}, объемный вес подугольных глин $\gamma = 2$ *т/м*^{3} График представлен на рис. 2.

Кривые $q = f(h)$ и $q_1 = f(h)$ построены в координатах: мощность пласта — давление. Как видно из рис. 2, они разделяют первый координатный угол на три зоны. Первую зону — между осью ординат и кривой прорывов $q = f(h)$ — мы называем зоной прорывов. Для нее характерно, что $Q \geqslant q$. Вторую зону — между кривой прорывов и кривой прочного состояния почвы — мы называем зоной деформации, для которой характерно соотношение $q > Q \geqslant q_1$. Зона прорывов и зона деформации, взятые вместе, образуют *опасную зону*. Зону между кривой $q_1 = f(h)$ и осью абсцисс мы называем зоной прочного состояния почвы или *безопасной зоной*. Для безопасной зоны характерно, что $Q \leqslant q_1$.

Пусть полное гидростатическое давление $Q = 90$ *т/м*^{2}. Отложим его значение на оси ординат и проведем прямую *А—Г* Она пересечет кривую $q = f(h)$ в точке *Б* и кривую $q_1 = f(h)$ в точке *В*. При заданном значении Q отрезок *АБ* показывает величину зоны прорывов, т. е. диапазон мощностей пласта подугольной глины h, при которых возможны прорывы подугольных вод в горные выработки. Отрезок прямой *БВ* дает величину зоны деформации — диапазон мощностей подугольных глин, при которых возможна их деформация в горных выработках. Вправо от точки *В* идет безопасная зона, характерная для мощностей пласта подугольной глины, обеспечивающих безопасное ведение горных работ без снижения полного гидростатического давления Q.

Нужно отметить, что величины указанных зон не являются постоянными. Они изменяются с изменением значения полного гидростатического давления Q. С увеличением Q опасная зона растет, а безопасная уменьшается, и наоборот, с уменьшением Q опасная зона уменьшается, а безопасная — увеличивается.

Рассмотрев общую схему, перейдем к нахождению конкретных значений искомых величин.

Определим по графику прогнозов (рис. 2) мощность пласта подугольной глины, при которой возможен прорыв подугольных вод из почвы выработки, при заданном значении $Q = 90$ *т/м*^{2}. Мощность пласта подугольной глины h_1 найдем, опустив перпендикуляр из точки пересечения кривой возможных прорывов и линии полного гидростатического давления Q, т. е. точки *Б*, на ось абсцисс. Точка *Б′* дает значение $h_1 = 4{,}4$ *м*.

С помощью графика может быть решена и обратная задача, т. е. по известному значению h определяется величина гидростатического давления q, при котором в данной точке возможен прорыв подугольных вод. Пусть, например, $h_2 = 3$ *м*. Для определения q из точки *Д* на оси абсцисс восставим перпендикуляр до пересечения его с кривой прорывов $q = f(h)$. Точка пересечения *Д′* дает значение q, равное 43 *т/м*^{2}. С увеличением h возрастает и q. Так, при $h_3 = 6$ *м*, $q = 158$ *т/м*^{2} и т. д.

График дает возможность быстро определить величину гидростатического давления, поглощаемого пластом подугольной глины q_1. Так, в точке *Б′* для $h_1 = 4{,}4$ *м*, $q_1 = 35$ *т/м*^{2}. Оно выражено отрезком *Б′Б″* Следовательно, величина q_1 может быть определена для любого значения h.

Наряду с указанными величинами по графику может быть определена необходимая величина снижения напора подугольных вод S при известном значении Q.

При гидростатическом давлении подугольных вод ($Q = 90$ *т/м²* и $h_1 = 4{,}4$ *м*) пласт подугольной глины не выдержит давления и будет прорван, так как поглощаемое им гидростатическое давление q_1 составляет только 35 *т/м²* или 35 *м* водяного столба. Очевидно, для безопасного ведения горных работ в данных условиях необходимо снизить давление на величину S_1, определяемую по формуле:

$$S_1 = Q - q_1. \qquad (7)$$

Эта же величина может быть получена по графику прогноза как разность отрезков *ББ′* и *Б′Б″*. В данном случае величина S_1 равна 55 *т/м²*. При одном и том же значении Q необходимая величина снижения гидростатического давления S не остается постоянной. Она зависит от мощности пласта подугольной глины h. С уменьшением h S возрастает. Так, при $h_1 = 4{,}4$ *м* $S_1 = 55$ *т/м²*; при $h_2 = 3$*м*, $S_2 = 72$ *т/м²*, а при $h_3 = 0$, $S_3 = 90$ *т/м²* (*АА′*). Последнее критическое значение h_3 показывает, что в случае отсутствия водоупора в почве угольного пласта и горных выработок возникает необходимость полного снижения напора подугольных вод.

Напротив, с увеличением мощности пласта подугольной глины h необходимая величина снижения гидростатического давления S уменьшается. Так, например, при $h_1 = 4{,}4$ *м*, $S_1 = 55$ *т/м²*, а при $h_4 = 6$ *м* S_4 уменьшилось до 28,5 *т/м²*.

При заданном значении $Q = 90$ *т/м²*, и дальнейшем увеличении h S стремится к нулю и достигает его в точке B при $h_5 = 7{,}4$ *м*.

Мощность пласта подугольной глины h_5, при которой не требуется снижения напора подугольных вод, и является в данных условиях минимальной мощностью защитной глинистой толщи, обеспечивающей безопасное ведение горных работ без проведения осушительных мероприятий. Вместе с тем, мощность пласта подугольной глины h_5 является критической для полного гидростатического давления $Q = 90$ *т/м²*. Она отделяет опасную зону или область работы с осушением, отвечающую условию $Q > q_1$, от безопасной зоны или области работы без осушения, отвечающей условию $Q \leqslant q_1$.

Выше указывалось, что величина опасной и безопасной зон изменяется с изменением значения Q. Покажем это на примере. В нашем случае полное гидростатическое давление Q было равно 90 *т/м²*. Пусть оно уменьшится до $Q_1 = 35$ *т/м²* (линия $Q_1 - Q_1$).

Из графика прогнозов (рис. 2) видно, что с уменьшением $Q = 90$ *т/м²* до $Q_1 = 35$ *т/м²* опасная зона уменьшилась, а безопасная увеличилась. При этом минимальная мощность защитной глинистой толщи h_5 с 7,4 *м* уменьшилась до 4,4 *м*. В связи с этим изменятся и все остальные величины. Гидростатическое давление, поглощаемое пластом подугольной глины, с $q_1 = 35$ *т/м²* уменьшится до $q_1' = 15$ *т/м²* (*Е′Е″*). Необходимое снижение давления с $S_1 = 55$ *т/м²* уменьшится до $S_1' = 20$ *т/м²* (*ЕЕ″*). При $Q_1 = q' = 35$ *т/м²* мощность пласта подугольной глины, при которой возможен прорыв, снизится с $h_1 = 4{,}4$ *м* до $h_1' = 2{,}7$ *м*, а $h_1 = 4{,}4$ *м* будет уже минимальной мощностью защитной глинистой толщи в новых условиях.

Из рассмотренного примера видно, что на основании минимального количества данных, которые могут быть получены во время разведки месторождения, предлагаемый приближенный метод расчета позволяет

сделать прогноз необходимости осушения напорного подугольного водоносного горизонта в пределах шахтного поля. Действительно, для составления графиков прогноза необходимо иметь всего четыре величины: ширину выработки l, объемный вес подугольной глины γ, полное гидростатическое давление Q и временное сопротивление глин разрыву $\sigma_р$.

Учитывая, что расчет производится для конкретных условий, ширина выработки в каждом отдельном случае известна как для подготовительных выработок, так и для очистных забоев. Она выбирается по горнотехническим соображениям обеспечения нормальной работы подземного транспорта и проветривания.

Так, например, в Подмосковном бассейне выемочные штреки для ленточного и скребкового конвейеров или однотонной вагонетки имеют вчерне ширину, понизу равную 2,7 *м*; двухпутевые штреки главного направления — 4,5 *м*.

В очистных забоях ширина предзабойного рабочего пространства зависит от принятого шага обрушения. При обрушении кровли через два вруба она составляет 6 *м*, при обрушении за каждым врубом — 4 *м*. Объемный вес подугольных глин неоднократно определялся различными исследователями. Учитывая результаты этих исследований, для расчетов можно принимать $\gamma = 2$ *т м*^{3}. Подобные результаты получены при исследовании подугольных глин буроугольных месторождений Селижаровского, Нелидовского и Дорогобужского районов в лаборатории гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института. Величина полного гидростатического давления Q на данном шахтном поле определяется по результатам разведочного бурения.

Из перечисленных величин труднее определяется временное сопротивление подугольных глин разрыву $\sigma_р$. Единичные определения $\sigma_р$ недостаточны, так как они могут дать искаженные результаты, которые скажутся на последующих расчетах. Следовательно, для получения надежных значений $\sigma_р$ при проходке разведочных выработок должны отбираться специальные монолиты и многократно определяться значения временного сопротивления глин разрыву. Учитывая трудности определения $\sigma_р$ в полевых условиях, в 1950—1951 гг. в лаборатории гидрогеологии и инженерной геологии Ленинградского горного института нами были проведены исследования по определению временного сопротивления подугольных глин западного крыла Подмосковного бассейна на разрыв.

В результате исследований установлено, что временное сопротивление глин с ненарушенной структурой определяется влажностью и трещиноватостью глин. Расчетное значение $\sigma_р$ с учетом естественной влажности в 15÷25% и трещиноватости можно принять равным 0,5÷0,6 *кг см*^{2}. Для прогноза прорывов из почвы горных выработок при разработке месторождений, обводненных напорными подугольными водами, и облегчения проектирования осушительных мероприятий составлен ряд графиков прогноза для типовых условий производства подготовительных и очистных работ в условиях Подмосковного бассейна.

На рис. 3 представлен график для выемочного штрека шириной понизу вчерне $l = 2{,}7$ *м*, $\gamma = 2$ *т/м*^{3} и $\sigma_р = 5$ *т/м*^{2}; на рис. 4 для того же штрека, но при $\sigma_р = 6$ *т м*^{3}. На рис. 5 и 6 представлены графики для двухпутевых штреков главных направлений, имеющих ширину понизу вчерне $l = 4{,}5$ *м* при $\gamma = 2$ *т/м*^{3} и $\sigma_р$, соответственно, 5 *т/м*^{2} и 6 *т м*^{2}.

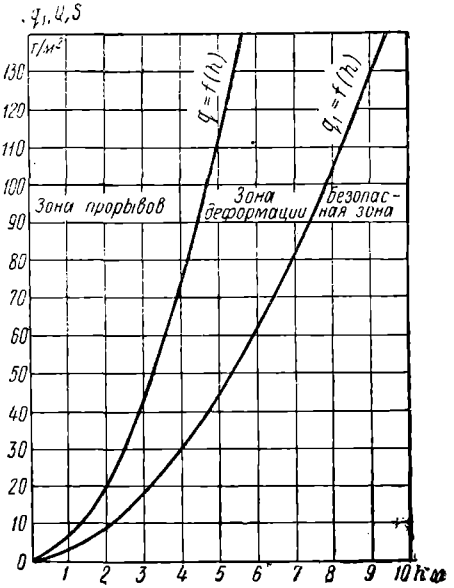


Рис. 3. График прогноза прорывов из почвы для выемочного штрека при $l = 2{,}7$ м, $\sigma_р = 5$ т/м², $\gamma = 2$ т/м³

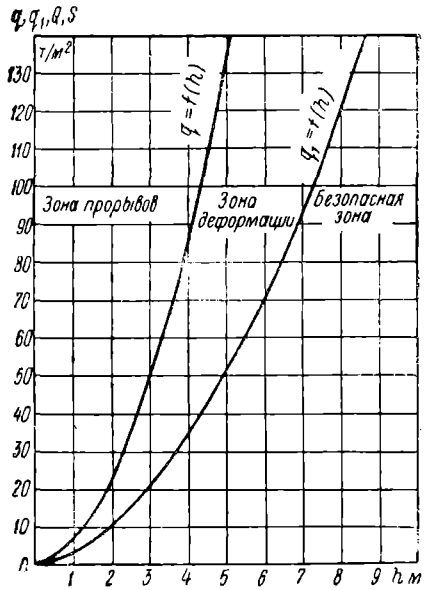


Рис. 4. График прогноза прорывов из почвы для выемочного штрека при $l = 2{,}7$ м, $\sigma_р = 6$ т/м², $\gamma = 2$ т/м³

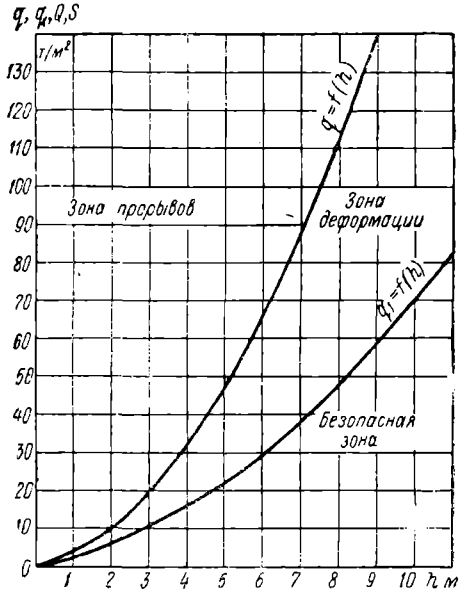


Рис. 5. График прогноза прорывов из почвы для двухпутевого штрека главного направления при $l = 4{,}5$ м, $\sigma_р = 5$ т/м², $\gamma = 2$ т/м³

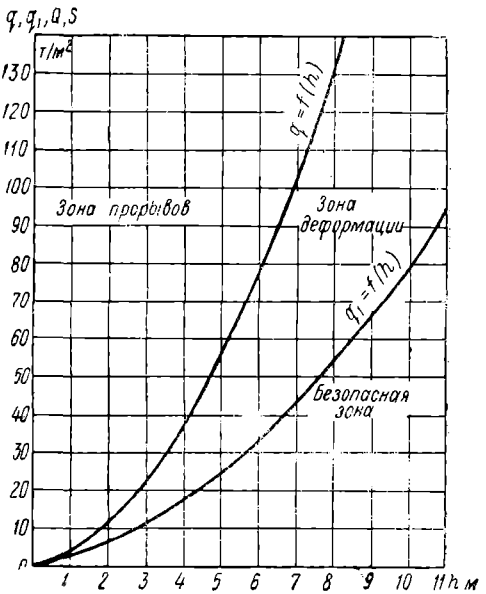


Рис. 6. График прогноза прорывов из почвы для двухпутевого штрека главного направления при $l = 4{,}5$ м, $\sigma_р = 6$ т/м², $\gamma = 2$ т/м³

На рис. 7—10 приведены графики для очистного забоя-лавы при работе с обрушением кровли и шаге обрушения 2 и 4 *м* при $\gamma = 2$ *т/м*^{3} и различных значениях временного сопротивления глин на разрыв.

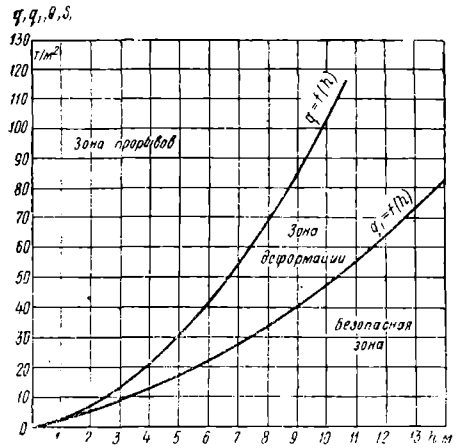


Рис. 7. График прогноза прорывов из почвы в лаве при шаге обрушения, равном 4 *м*, $l = 6$ *м*, $\sigma_р = 5$ *т/м*^{2}, $\gamma = 2$ *т/м*^{3}

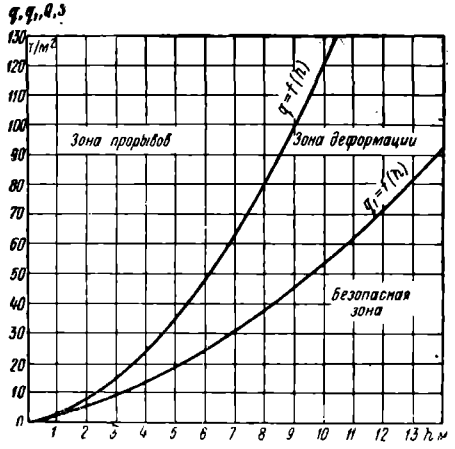


Рис. 8. График прогноза прорывов из почвы в лаве при шаге обрушения, равном 4 *м*, $l = 6$ *м*, $\sigma_р = 6$ *т/м*^{2}, $\gamma = 2$ *т/м*^{3}

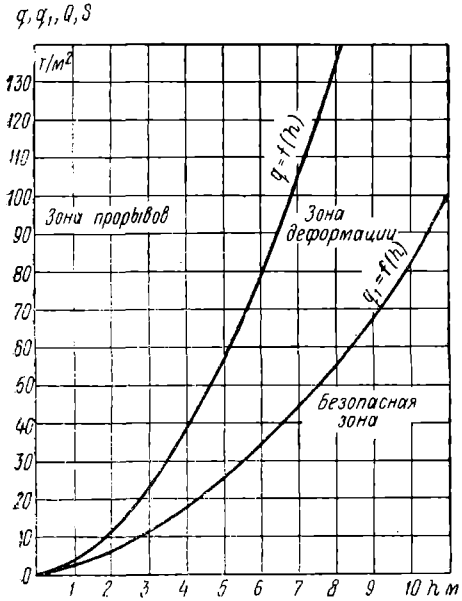


Рис. 9. График прогноза прорывов из почвы в лаве при шаге обрушения, равном 2 *м*, $l = 4$ *м*, $\sigma_р = 5$ *т/м*^{2}, $\gamma = 2$ *т/м*^{3}

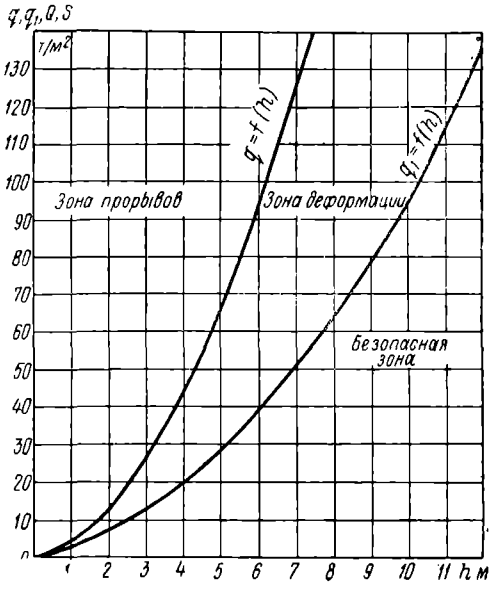


Рис. 10. График прогноза прорывов из почвы в лаве при шаге обрушения, равном 2 *м*, $l = 4$ *м*, $\sigma_р = 6$ *т/м*^{2}, $\gamma = 2$ *т/м*^{3}

Рассмотренный метод прогноза прорывов воды или плывуна из почвы горных выработок, несмотря на некоторую приближенность, вполне может быть использован при проектировании осушительных мероприятий на обводненных угольных месторождениях нашей Родины.

Поступило 25. V. 1951 г.