Записки Ленинградского Горного Института. Том XIV, 1941
Annales des l'Institut des Mines à Léningrad. Vol. XIV, 1941

Определение депрессии естественной тяги методом подсчета[1]

Доц. *Д. Ф. Борисов*

Die Ermittelung von Depression des natürlichen Wetterzuges mittels Berechnungsmethode

Doz. *D. F. Borisoff*

Естественная тяга, как известно, является результатом разницы в весе воздуха подающих и выдающих воздух выработок.

В соответствии с этим и депрессия естественной тяги зависит от веса, т. е. от температуры и давления воздуха в исходящей и входящей струе. При этом в зависимости от депрессии, развиваемой всасывающим или нагнетательным вентилятором, плотность воздуха исходящей или входящей струи может изменяться в значительных пределах, так что наряду с естественной тягой, образующейся в результате нагревания воздуха и изменения его состава, получается и естественная тяга, создаваемая вентилятором—„искусственно создаваемая естественная тяга".

В настоящее время, кроме методов подсчета, известен ряд способов непосредственного замера депрессии естественной тяги существующего рудника. Эти способы связаны с изменением вентиляционного режима рудника.

Перекрыв всю воздушную струю перемычкой, можно непосредственно измерить депрессию естественной тяги микроманометром, приключив его к обеим сторонам перемычки.

После остановки вентилятора отсчет даст собственно естественную тягу, а при работе вентилятора суммарную депрессию, развиваемую вентилятором совместно с естественной тягой. После вычитания депрессии вентилятора можно узнать и полное значение естественной тяги, включая и искусственно создаваемую естественную тягу. Замеренная депрессия искусственно создаваемой естественной тяги будет при этом несколько выше, чем при движении воздуха, так как замер не учтет уменьшения (при всасывающем вентиляторе) разрежения за счет потери депрессии в выработках.

Кроме этого способа, требующего полной приостановки проветривания, можно определить естественную тягу и косвенным путем, несколько изменяя на короткий срок (чтобы не изменить тепловой режим рудника) условия проветривания, увеличивая сопротивление рудника или меняя количество оборотов вентилятора.

Первый из этих методов сводится к введению на пути движения всей вентиляционной струи[2] местного сопротивления определенной величины и замерам до и после изменения условий проветривания депрессии вентилятора (h) и количества проходящего воздуха (Q).

Пусть h_b' и h_b'', Q и Q_1 депрессия (в *мм* вод. столба) и количество воздуха

[1] Настоящая работа была подготовлена автором в 1935 г. и предполагалась к напечатанию в сборнике Главугля, издание которого по техническим причинам не было осуществлено.

[2] Можно вычислить естественную тягу и путем введения сопротивления в одно из боковых ответвлений, но этот способ в виду некоторой сложности подсчетов опускаем.

(в $м^3/сек$) до и после введения сопротивления; R полное сопротивление рудника, а R_1 дополнительно введенное местное сопротивление в единицах удельного сопротивления. В этом случае депрессия естественной тяги h_e может быть найдена путем следующих несложных алгебраических выкладок.

До введения дополнительного сопротивления:

$$h_b' + h_e = RQ_1^2; \quad R = \frac{h_b' + h_e}{Q_1^2}.$$

После введения дополнительного сопротивления:

$$h_b'' + h_e = (R + R_1)Q_2^2.$$

Отсюда:

$$R = \frac{h_b'' + h_e - R_1 Q_2^2}{Q_2^2}.$$

Приравнивая оба значения и решая равенство относительно h_e, получим:

$$h_e = \frac{h_b'' Q_1^2 - h_b' Q_2^2 - R_1 Q_2^2 Q_1^2}{Q_2^2 - Q_1^2}.$$

Если величина введенного местного сопротивления неизвестна, а замерена (микроманометром) его депрессия h_c, то:

$$h_e = \frac{(h_b'' - h_c) Q_1^2 - h_b' Q_2^2}{Q_2^2 - Q_1^2}.$$

Второй способ заключается в изменении числа оборотов вентилятора. Замеры депрессии и количества воздуха дают возможность определить депрессию естественной тяги алгебраическим путем.

Если сохранить те же обозначения, что и в предыдущем случае, то будем иметь.

Вначале:

$$h_b' + h_e = RQ_1^2; \quad R = \frac{h_b' + h_e}{Q_1^2}.$$

После изменения скорости вращения вентилятора:

$$h_b'' + h_e = RQ_2^2; \quad R = \frac{h_b'' + h_e}{Q_2^2}.$$

Приравнивая оба значения и решая равенство относительно h_e, получим:

$$h_e = \frac{h_b'' Q_1^2 - h_b' Q_2^2}{Q_2^2 - Q_1^2}.$$

Вычисленная такими путями депрессия при условии незначительных изменений вентиляционного режима дает суммарную естественную тягу, включая с известной неточностью и искусственно создаваемую.

Все перечисленные способы связаны с полным прекращением или частичным изменением проветривания рудника, поэтому для сильно газовых рудников, где всякие нарушения проветривания недопустимы, большое значение имеет метод определения естественной тяги подсчетом на основании замеренных в руднике температур и давления.

Метод подсчета является единственным для вновь проектируемых шахт, где депрессию естественной тяги приходится подсчитывать на основании полученных путем прогноза температуры и давлений.

Этому методу и посвящена настоящая работа.

Естественная тяга зависит от плотности (удельного веса) воздуха во входящей и исходящей струе, поэтому для определения депрессии естественной тяги в первую очередь необходимо выяснить характер изменения плотности воздуха с глубиной.

Законы изменения плотности воздуха вообще в атмосфере, а в руднике тем более, представляют очень сложную зависимость между температурой, глубиной и плотностью воздуха.

В метеорологии принято для упрощения заменять общий для всех газов поли-

тропический закон изменения плотности воздуха с высотой иными более простыми закономерностями, например: изотермической, адиабатической или политропической, но с определенным показателем политропы.

В горной технике для подсчетов естественной тяги долгое время пользовались законом однородной атмосферы, принимая на некотором участке удельный вес воздуха постоянным и равным среднему из крайних его значений (I).

В последнее время стали применять распределение плотности по изотермической атмосфере (формулу, рекомендуемую проф. Уиксом), принимая постоянной только температуру.

Для окончательного выбора методики подсчета естественной тяги необходимо провести сравнение между различными способами подсчета давления, что фактически дает возможность определить и метод расчета депрессии естественной тяги.

Начнем с самого простого случая. Представим себе вертикальную шахту с площадью поперечного сечения A $м^2$ глубиной H $м$ и определим, как будет меняться давление воздуха с глубиной в зависимости от температуры в шахте и давления у ее устья.

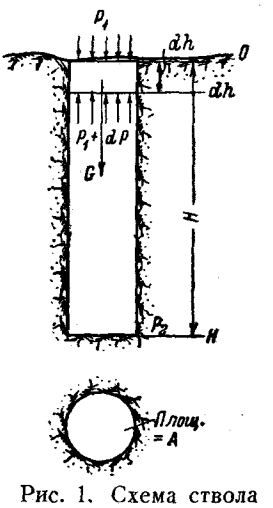


Рис. 1. Схема ствола вертикальной шахты.

Примем атмосферное давление у устья шахты равным P и рассмотрим условия равновесия элементарного объема воздуха, удаленного на расстояние dh от поверхности.

Сверху на него по площади A давит вес атмосферы и, кроме того, вес элементарного объема воздуха, заключенного между горизонтами O и dh.

Противодействует же этим силам только давление воздуха, снизу равное сумме атмосферного давления P и приращению давления dp (на участке dh).

Чтобы этот элементарный объем воздуха остался в покое, необходимо равенство действующих на него сил, математически выражаемое уравнением:

$$A(\gamma\, dh + P) = (p + dp)\, A. \qquad (1)$$

Вес воздуха $G = \gamma A\, dh$ где γ —удельный вес воздуха.

Путем несложных алгебраических преобразований получим:

$$\gamma dh = dp.$$

Таким образом, для определения зависимости между глубиной и давлением необходимо решить диференциальное уравнение:

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \int_{P_1}^{P_2} \frac{dp}{\gamma}. \qquad (2)$$

Правая часть этого уравнения не может быть разрешена в общем виде, так как удельный вес воздуха γ является функцией давления. Поэтому необходимо ввести какие-то дополнительные ограничительные условия.

Решим этот интеграл для основных случаев возможного изменения давления с глубиной: по закону однородной атмосферы, адиабатическому, изотермическому и политропическому с определенным показателем политропы.

Примем удельный вес воздуха не меняющимся с глубиной (постоянным) и тем самым не зависящим от давления—„однородная атмосфера“: $\gamma = \text{const}$.

Тогда уравнение (2) примет вид

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \frac{1}{\gamma} \int_{P_1}^{P_2} dp.$$

Если принять $h_1 = 0$, получим $H = \frac{1}{\gamma}(P_2 - P_1)$ или иначе:

$$P_2 = P_1 + \gamma H.$$

Получаем формулу, рекомендуемую для подсчета естественной тяги проф. Протодьяконовым.

Перейдем к изотермическому расслоению воздуха, сделав допущение о постоянстве температуры воздуха, и решим уравнение для этого случая:

$$T = \text{const.}$$

Температура, давление и объем связаны между собой известным законом Клапейрона

$$PV = RT,$$

здесь: T — абсолютная температура в °Ц, R — газовая постоянная, P — давление, V — удельный объем (объем, занимаемый 1 *кг* газа).

Решаем это уравнение относительно удельного объема

$$V = \frac{RT}{P}$$

и заменяя V через $\frac{1}{\gamma}$, получим:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{RT}{P}.$$ [1]

Подставляем это значение в подъинтегральную величину

$$\int_{h_1}^{h_2} dh = \int_{P_1}^{P_2} \frac{RT}{P}\, dp = RT \int_{P_1}^{P_2} \frac{dp}{p}.$$

После интегрирования получаем:

$$H = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

или:

$$P_2 = P_1 e^{H/RT}$$

При переходе к десятичным логарифмам это выражение можно представить в виде:

$$\lg \frac{P_2}{P_1} = \frac{H}{MRT},$$

где M — модуль перехода от натуральных логарифмов к десятичным.

Заменяя постоянные их численными значениями, т. е.

$$M = 2{,}3026; \quad R = 29{,}27,$$

получаем формулу изотермической атмосферы:

$$\lg \frac{P_1}{P_2} \cong 0{,}015 \frac{H}{T} \left(\text{точнее } 0{,}01484 \frac{H}{T}\right)$$

в таком виде, как ее приводит проф. Уикс.

Попытаемся решить основное уравнение в более общем виде, выразив связь между давлением и объемом воздуха в виде политропы:

$$Pv^n = \text{const},$$

где: n — показатель политропы.

Пользуясь значением V из формулы Клапейрона

$$V = \frac{RT}{P},$$

---

[1] Ускорение силы тяжести во всех наших формулах принимается постоянным, не меняющимся с глубиной, так как его изменение с глубиной незначительно и не может повлиять на результат.

приводим основное уравнение к иному виду:

$$P\left(\frac{RT}{P}\right)^n = \text{const}$$

или:

$$P^{1/n} \cdot \frac{RT}{P} = \text{const}$$

и наконец:

$$P^{\frac{1-n}{n}} \cdot RT = \text{const}.$$

Преобразуя дальше, получим:

$$T = \frac{\text{const}}{R} P^{\frac{n-1}{n}}.$$

Для начальной точки $P = P_1$ и $T = T_1$, поэтому последнее уравнение можно представить в виде

$$T = T_1 \left(\frac{P}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

По найденному значению T определим удельный вес воздуха по уравнению:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{RT}{P},$$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{RT_1 \cdot P^{-\frac{1}{n}}}{P_1^{\frac{n-1}{n}}}.$$

Подставив значение удельного веса в подъинтегральную величину, приведем интеграл к следующему виду:

$$H = \frac{RT}{P_1^{\frac{n-1}{n}}} \int_{P_1}^{P_2} P^{-\frac{1}{n}} dp.$$

После интегрирования получаем:

$$H = \frac{RT}{P_1^{\frac{n-1}{n}}} \cdot \frac{n}{n-1} \left(P_2^{\frac{n-1}{n}} - P_1^{\frac{n-1}{n}}\right),$$

откуда:

$$H = \frac{n}{n-1} RT \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

и наконец:

$$P_2 = P_1 \left\{\frac{n-1}{n} \frac{H}{RT} + 1\right\}^{\frac{n}{n-1}}$$

Подставляя вместо R его численную величину, получим:

$$P_2 = P_1 \left(0{,}034 \frac{n-1}{n} \cdot \frac{H}{T} + 1\right)^{\frac{n}{n-1}}$$

Для адиабатического расслоения атмосферы $n = 1{,}405$ и уравнение примет вид

$$P_2 = P_1 \left(1 + 0{,}288 \frac{H}{RT}\right)^{3{,}46}$$

$$P_2 = P_1 \left(1 + 0{,}0098 \frac{H}{T}\right)^{3{,}46}.$$

Таким образом, окончательно мы имеем четыре формулы для определения давления в зависимости от глубины и плотности (II) или температуры воздуха (I, III, IV).

I. Политропическая атмосфера:

$$P_1 = P_1 \left(0{,}034 \frac{n-1}{n} \cdot \frac{H}{T} + 1\right)^{\frac{n}{n-1}}. \qquad (I)$$

II. Однородная атмосфера:

$$P_2 = P_1 + \gamma H. \qquad (II)$$

III. Изотермическая атмосфера:

$$P_2 = P_1 e^{H/RT}; \qquad \lg P_2 = \lg P_1 + 0{,}01484 \frac{H}{T}. \qquad (III)$$

IV. Адиабатическая атмосфера:

$$P_2 = P_1 \left(0{,}0098 \frac{H}{T} + 1\right)^{3{,}46}. \qquad (IV)$$

Вес же столба воздуха высотой H найдется как разница между начальным и конечным давлением:

$$(P_2 - P_1).$$

При подсчете естественной тяги рудника по формуле однородной атмосферы необходимо разбить рудник на ряд участков, выяснить высотные отметки крайних точек участка и замерить в них давление и температуру воздуха.

Удельный вес воздуха, если не учитывать влияния влаги и считать воздух сухим, можно определить по общеизвестной формуле:

$$\gamma = 1{,}293 \frac{1 \cdot 273}{760 \cdot (273 + t)} = 0{,}4645 \frac{P}{273 + t},$$

здесь: P — давление в миллиметрах ртутного столба, а t — температура в °Ц.

Если же учитывать влияние содержащейся в рудничном воздухе влаги, то лучше пользоваться другой формулой:

$$\gamma = \varphi \gamma_s + 1{,}293 \frac{P - Pd}{760} \cdot \frac{273}{T},$$

здесь: φ — относительная влажность воздуха; γ_s — удельный вес сухого пара при данной t, P_d — упругость водяного пара в *мм* ртутного столба.

При подстановке в формулу (II) значений начального давления, превышения и среднего для участка удельного веса находим конечное давление и по разнице давлений вес столба воздуха.

При пользовании формулой изотермической атмосферы необходимо давление определить лишь в одной начальной точке, а по участку замерить температуру, тогда, зная взаимное превышение пограничных точек, можно определить и конечное давление (о подсчете с учетом влажности см. ниже). Для адиабатической атмосферы также достаточно знать давление у устья шахты и температуру воздуха в руднике. При политропической же атмосфере решение вопроса усложняется необходимостью предварительного определения показателя политропы.

Критерием для выбора методики подсчета естественной тяги может служить фактический характер изменения температуры или давления рудничного воздуха с глубиной и сравнение с распределением по принятым в качестве основных закономерностям.

Определим характер изменения температуры воздуха с глубиной для принятых нами для сравнения четырех законов расслоения атмосферы.

Введем дополнительное предположение, что температура (как это свойственно всякой политропической атмосфере) изменяется с глубиной по линейному закону и отыщем постоянный параметр этой прямой. [1]

[1] Вывод сделан по Г. Виллету „Очерк динамической метеорологии", стр. 15, 1932.

Заменяя γ равной ему величиной $\frac{P}{RT}$, получим:

$$dh = \frac{RT\,dp}{P}.$$

Но по принятому условию температура — линейная функция высоты. Поэтому мы можем температуру на любой глубине выразить через начальную температуру:

$$T_2 = T_1 + ah.$$

В результате после подстановки в ранее выведенное диференциальное уравнение получим:

$$\frac{dh}{T_1 + ah} = R\,\frac{dp}{P}$$

и после интегрирования:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{Ra} \ln \frac{T_1 + ah}{T_1}$$

или

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_1 + ah}{T_1}\right)^{1/Ra} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/Ra}.$$

Но с другой стороны

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\gamma_2 R T_2}{\gamma_1 R T_1} = \frac{\gamma_2 T_2}{\gamma_1 T_1},$$

отсюда:

$$\frac{\gamma_2 T_2}{\gamma_1 T_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/Ra}$$

и

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/Ra-1}.$$

Расслоение по принципу однородной атмосферы основано в предположении постоянства плотности воздуха (его удельного веса) $\gamma_1 = \gamma_2$. Последнее же может быть соблюдено лишь при условии, что

$$\frac{1}{Ra} - 1 = 0$$

и

$$a = \frac{1}{R} = \frac{1}{29{,}27} = 0{,}342 \text{ град/}м,$$

что соответствует увеличению температуры на 3,42° Ц на каждые 100 *м* глубины, т. е. температурный градиент однородной атмосферы равен 3,42° Ц.

Для адиабатического расслоения величину температурного градиента можно определить после некоторых преобразований по основной формуле, выражающей зависимость между глубиной и давлением, введя в уравнение политропы показатель степени, характеризующий адиабатическое расслоение — 1,405.

Выше была приведена следующая зависимость между глубиной и давлением:

$$H = \frac{n}{n-1}\,RT_1\left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right].$$

Исходя из соотношения между температурой и давлением:

$$T = T_1\left(\frac{P}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

или

$$\frac{T}{T_1} = \left(\frac{P}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}},$$

можно перейти к непосредственной зависимости между глубиной и температурой:

$$H = \frac{n}{n-1} \cdot R(T_1 - T_2),$$

откуда температурный градиент при $n = 1{,}405$ (адиабаты) определится в:

$$(T_1 - T_2) = \frac{H(n-1)}{n \cdot R} = \frac{100 \cdot (1{,}405)}{1{,}405 \cdot 29{,}27} = 0{,}98^\circ \text{ Ц.}$$

Температурный градиент изотермической температуры очевидно равен нулю.

Таким образом, трем приведенным выше законам изменения давления с глубиной соответствуют и строго определенные изменения температуры (температурные градиенты):

Температурный градиент	для	однородной атмосферы	3,42°
„	„	для адиабатич. атмосферы	0,98°
„	„	для изотермич. атмосферы	0,00°

Очевидно, что от фактического изменения температуры рудничного воздуха с глубиной будет зависеть и точность той или другой формулы.

Изменения же температуры воздуха в руднике будут зависеть от целого ряда различных факторов: геотермического градиента пород, наклона выработки, количества проходящего воздуха, размеров выработок, теплопроводности окружающих пород, размеров охлаждающей зоны и т. д.

A priori можно сказать, что изопикнический закон (однородная атмосфера) будет полностью отвечать лишь распределению температур при полном отсутствии движения воздуха, когда воздух полностью примет температуру окружающих пород. Повышение температуры при расслоении воздуха по закону однородной атмосферы очень близко к повышению температуры пород в толще земной коры.

В самом деле, при однородной атмосфере температура воздуха повышается на 1° Ц каждые 29,5 *м*, обычный же геотермический градиент в Донецких, например, условиях 30—35 *м*.

Для выяснения характера изменения состояния воздуха в руднике обратимся к опытным данным, полученным замерами на шахте Ново-Смольяниновской № 11, и определим температурный градиент для различных выработок отдельно для наклонных и вертикальных.

Нужно отметить, что нашими обследованиями не все выработки освещены одинаково широко. Больше всего получено данных по вертикальным шахтам, для которых замеры проведены в различное время года как для входящей, так и для исходящей струи (подъемная и вентиляционная шахты Ново-Смольяниновского рудника). Наклонные же выработки специальному обследованию не подвергались, замеры в них проводились лишь попутно при обходе всей рудничной струи.

Подсчет температурного градиента наклонных выработок, произведенный для уклонов шахты Смолянка № 11 по двум замерам (апрельскому и июльскому) сведен в табл. 1.

Характер изменения температуры для этих выработок, как показывает таблица, не может быть подчинен никаким известным в аэродинамике законам, так как зачастую температурный градиент получается очень большим, а кроме того на исходящей струе после омывания очистных работ воздух нагревается при движении вверх, т. е. температурный градиент становится отрицательным. Не исключена возможность получения отрицательного градиента и в откаточных выработках на свежей струе: так, например, когда чистый воздух поднимается по бремсбергу.

На основании приведенных цифр и соображений можно уверенно сказать, что подсчет естественной тяги наклонных выработок по любой из выведенных выше формул может дать значительные отклонения от истинной.

С вертикальными выработками, как увидим ниже, положение несколько лучше.

В шахтах (Ново-Смольяниновской) замеры температуры нами произведены три раза в различные времена года — в сентябре, апреле и январе. Для всех этих

Таблица 1

Изменение температуры в наклонных выработках

(1-й западный уклон и ходок ш. Ново-Смольяниновской № 11)

№№ точек	Вход. струя			Исход. струя		
	Отметка в *м*	*t*° Ц	Температурный градиент	Отметка в *м*	*t*° Ц	Температурный градиент
			Апрель			
1	—479,68	9,6			20,6	
2	—548,61	12,2	3,76		24,0	4,94
3	—558,95	12,8	5,8		25,0	10,0
4	—595,77	16,8	10,9		16,8	22,0
			Июль			
1	—479,68	23,4		—474,05	27,2	
2	—548,44	23,6	0,3	—523,0	29,6	4,9
3	—574,37	23,6	0	—538,47	29,6	0
4	—595,77	25,3	8,0	—546,55	31,6	26,0
5	—595,77	25,3	8,0	—571,5	25,8	—23,2
				—595,77	25,3	—20,2

условий определен температурный градиент. Результаты сведены в табл. 2 и представлены на диаграмме (рис. 2 и 3).

Таблица 2

Изменение температурного градиента в вертикальных выработках

(ш. Ново-Смольяниновская № 11)

№№ точек	Замер 29/I				Замер 5/IV				Замер 3/IX			
	Входящ. струя		Исход. струя		Входящ. струя		Исход. струя		Входящ. струя		Исход. струя	
	t°	Температурн. градиент	*t*°	Температурн. градиент	*t*°	Температурн. градиент	*t*°	Температурн. градиент	*t*°	Температурн. градиент	*t*°	Температурн. градиент
1⁰	—3,2		8,9		—4,0		8,4		24,4		20,0	
1	6,8	11,3	11,8	2,88	0,5	5,1	15,8	7,3	19,6	5,4	20,2	—0,2
2	7,4	0,68	17,4	5,53	1,0	0,56	16,2	0,395	16,4	3,6	20,6	0,6
3	7,8	0,45	18,0	0,6	1,8	0,9	17,0	0,79	16,5	0,11	20,9	0,7
4	8,0	0,23	18,2	0,2	2,8	1,1	17,4	0,395	16,5	0,0	21,3	0,395
5	8,4	0,45	18,7	0,5	3,8	0,45	17,8	0,345	16,6	0,11	21,7	0,395
6	8,8	0,45	19,0	0,3	3,8	0,68	18,2	0,39	16,7	0,11	22,0	0,300
7	9,3	0,56	19,0	0,0	4,8	1,1	18,2	0	17,3	0,68	22,6	0,60
8	9,6	0,34				0,0			17,4	0,11	21,1	0,50

Табл. 2 и рис. 2 и 3 ясно показывают, что приращение давления воздуха в вертикальных выработках происходит по закону, близкому к адиабатическому и изотермическому расслоению, так как в большинстве случаев температурный градиент находится в пределах от 0 до 1°.

Расслоению же по однородной атмосфере близко состояние воздуха в верхних участках шахты с неравновесным состоянием воздуха, где температурный градиент доходит даже до 11°; с глубиной же температурный градиент приближается к 0 (изотермическая атмосфера). Сделать окончательный выбор между изотермическим и адиабатическим расслоением или определить глубину, с которой можно уверенно пользоваться изотермической атмосферой, на основании имеющихся небольших данных не представляется возможным, тем более, что и температурный градиент колеблется в значительных пределах. Если для некоторых условий (31/IX — входящая струя) наиболее близка изотермическая атмосфера, то в других случаях истинный закон изменения температуры, где-то в промежутке между адиабатой и изотермой.

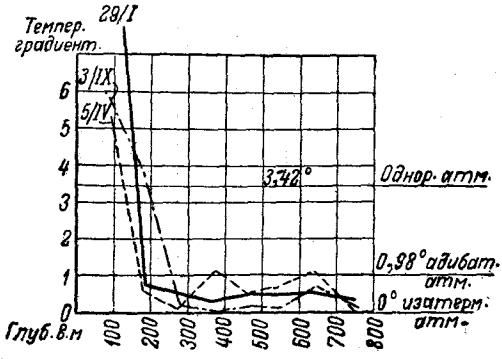


Рис. 2. Изменение температурного градиента с глубиной для входящего воздуха.

Вообще говоря, в зависимости от характера изменения плотности воздуха с глубиной, воздушный поток может находиться в одном из трех состояний равновесия: устойчивом, неустойчивом или безразличном. Поэтому характер расслоения рудничного воздуха является и показателем устойчивости. Разберем этот вопрос несколько подробнее.

Под устойчивым распределением воздуха (в метеорологии) понимается такое состояние воздушных масс, при котором после искусственного перенесения некоторого количества воздуха с одной глубины в другую он стремится вернуться в прежнее положение.

При неустойчивом распределении после перемещения воздух стремится удалиться от своего исходного положения.

Безразличное равновесие характеризует такое расслоение воздуха, при котором частица воздуха после любого перемещения остается в новом положении.

Устойчивость расслоения воздушной массы зависит от соотношения между плотностью воздуха, перенесенного в новое положение, и плотностью окружающей его среды, т. е. от характера изменения плотности воздуха с глубиной.

Переносимая вверх или вниз частица воздуха при условии отсутствия воздействия окружающей среды (температурных влияний) будет адиабатически расширяться или сжиматься.

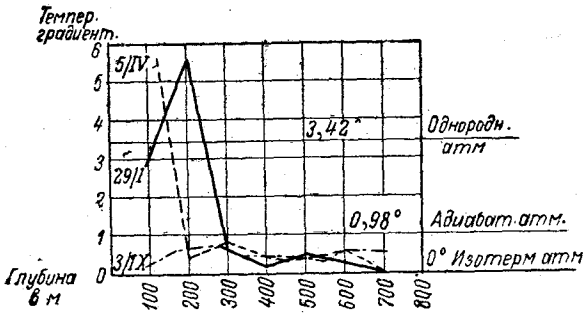


Рис. 3. Изменение температурного градиента с глубиной для исходящего воздуха.

Очевидно, что, если вся воздушная масса расслоена по адиабате, то перенесенный воздух будет немедленно принимать плотность окружающего воздуха и тем самым воздушная масса будет находиться в безразличном равновесии.

Таким образом, можно сказать, что при температурном градиенте 0,98° воздух находится в безразличном равновесии.

При большем температурном градиенте при переносе частицы воздуха в новое положение (например вверх) на расширение уйдет лишь часть тепла (0,98° на 100 *м*) и поэтому температура перенесенной частицы будет выше температуры окружающего воздуха. Воздух попадает в среду с большей плотностью, и в результате частица воздуха будет стремиться подняться все выше и выше. Получается неустойчивое равновесие.

В том же случае, когда температурный градиент меньше 0,98°, разницы температур не хватит на адиабатическое расширение, воздух при движении вверх

переохладится и попадет в среду с меньшей температурой, т. е. более плотную. В результате частица воздуха будет стремиться вернуться в прежнее положение — устойчивое равновесие.

Приведенные рассуждения показывают возможность установления устойчивости воздушной массы по температурному градиенту.

При	температурном	градиенте	$0{,}98°$ . . . равновесие безразличное
»	»	»	$> 0{,}98°$ . . . » неустойчивое
»	»	»	$< 0{,}98°$ . . . » устойчивое

В метеорологии для выяснения устойчивости температурного расслоения воздуха пользуются графическим методом.

По оси ординат откладываются глубины, а по оси абсцисс температура, но масштаб при этом выбирается такой, при котором одинаковому отрезку соответствуют 100 *м* глубины (по оси ординат) и 1° Ц (по оси абсцисс). Для упрощения температурный градиент адиабатического расслоения безразличного равновесия принимается равным 1° вместо 0,98°. При таких условиях адиабатическое расслоение изображается прямой, пересекающей координатные оси под углом 45°.

Расслоение с меньшим температурным градиентом (устойчивое равновесие) при выбранном направлении осей (глубина вниз и температура влево) изображается прямой с большим углом наклона к оси абсцисс, и неустойчивое равновесие будет изображаться меньшим углом наклона, т. е. все линии с наклоном от нуля до 45° характеризуют неустойчивое равновесие, а с наклоном от 45 до 180° — устойчивое.

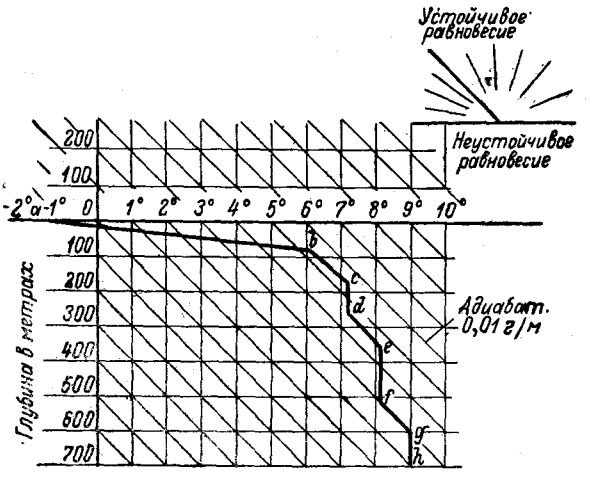


Рис. 4. Изменение температуры с глубиной (как показатель устойчивости равновесия воздуха).

Отрицательный градиент увеличения температуры с высотой (например бремсберги) характеризует особенно устойчивое расслоение воздушной массы.

По такому методу нами построено изменение температуры входящего воздуха шахты Ново-Смольяниновской (рис. 4). На этой кривой мы отчетливо видим, что первому участку до глубины примерно 100 *м* соответствует неустойчивое расслоение; на участках *bc*, *df* и *fg* расслоение близко к безразличному и на участках *ed*, *ef* и *gh* устойчивое расслоение.

Такая диаграмма для наклонных выработок в известной степени может характеризовать влияние естественной тяги на проветривание диффузией и показывать интенсивность обмена воздуха при проходке выработок.

Например, для бремсбергов с отрицательным температурным градиентом обмену чистого и загрязненного нагретого воздуха будет препятствовать устойчивое состояние воздушного столба и, наоборот, для уклонов с большим температурным градиентом обмену воздуха будет способствовать неустойчивость воздушного столба.

Закон Архимеда дает возможность определить и вертикальную силу, получающуюся в результате разной плотности жидкостей. По этому закону, каждая единица объема воздушной массы, окруженной воздухом иной плотности, будет находиться под действием вертикальной силы, равной $g(\delta_1 - \delta)$, чему соответствует ускорение

$$g\left(\frac{\delta' - \delta}{\delta}\right) \text{ м/сек}^2,$$

здесь δ_1 и δ_2 — плотность воздуха.

При постоянной влажности $\frac{\delta_1}{\delta} = \frac{T}{T_1}$ вертикальное ускорение равно (2):

$$g\left(\frac{T-T_1}{T}\right).$$

Если бы нам был известен закон движения двух встречных воздушных потоков по одной выработке, то мы смогли бы определить и скорость, а значит и количество воздуха, проходящее по выработке вследствие неустойчивого состояния воздуха. К сожалению, этот закон в настоящее время неизвестен, поэтому этим методом можно лишь выяснить вероятность большей или меньшей интенсивности движения воздуха.

Вообще говоря, приведенные три случая расслоения атмосферы (однородное, адиабатическое, изотермическое) являются тремя частными случаями политропической атмосферы, поэтому может оказаться, что вместо подсчета по адиабате ($n = 1{,}405$) или по изотерме ($n = 1{,}00$) подсчет лучше вести, ориентируясь на промежуточный показатель степени.

Для проверки выводов, полученных на основании температурного градиента, нами были вычислены для одного из замеров и показатели политропы.[1]

Показатель политропы (Прандтль, стр. 38) можно определить из соотношения между температурой и давлением

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

После логарифмирования это выражение преобразуется в

$$\lg\frac{T_2}{T} = \frac{n-1}{n}\lg\frac{P_2}{P_1},$$

откуда:

$$n'' = \frac{\lg\frac{P_2}{P_1}}{\lg\frac{P_2}{P_1} - \lg\frac{T_2}{T_1}}.$$

Кроме этого показатель политропы можно определить из соотношения между высотой и температурой:

$$n' = \frac{H}{H + R(T_2 - T_1)} = \frac{1}{1 + \frac{R(T_2-T_1)}{H}}.$$

Вычисленные показатели политропы (по этим двум формулам) сведены в табл. 3. По последней формуле вычисление проведено как для R постоянного (для сухого воздуха) = 29,27, так и для R переменного, в зависимости от влажности воздуха:

$$n' = \frac{1}{1 + \frac{R(T_2-T_1)}{H}}; \quad n'' = \frac{\lg\frac{P_2}{P_1}}{\lg\frac{P_2}{P_1} - \lg\frac{T_2}{T_1}}.$$

Показатель политропы за исключением первого участка у поверхности колеблется сравнительно незначительно в пределах от 1,0 до 1,4 и средний показатель $n = 1{,}156$ (подсчет по температуре) и 1,108 (подсчет по температуре и P).

Полученный по этим данным средний показатель политропы $n = 1{,}13$ несколько ниже обычно даваемых в литературе цифр 1,20—1,25.

Для окончательного выбора формулы для подсчета естественной тяги произведем подсчеты депрессии естественной тяги всеми перечисленными методами (однородная атмосфера, изотерма, адиабата и политропа), причем для политропы возьмем средний показатель 1,25, считающийся, судя по литературным данным, наиболее

[1] К сожалению, только для этого замера (29/I) были определены и температура, и давление.

близким к фактическому (этот показатель близок к среднему между изотермой и адиабатой).

Как указывалось выше, депрессия естественной тяги выражается разностью весов двух столбов входящего и исходящего воздуха.

Представим рудник в виде следующей простой схемы (рис. 6). Обозначим давление на поверхности для входящей струи P_1 (точка A) и для исходящей струи (точка C, приведенная к тому же уровню) P_1' и подсчитанное давление в нижних точках по входящей (точка B) и исходящей (точка D) струям соответственно через P_2 и P_2'.

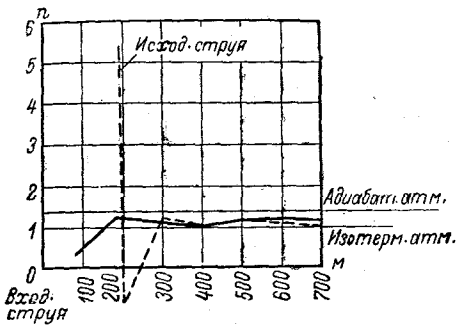


Рис. 5а. Изменение показателя политропы.

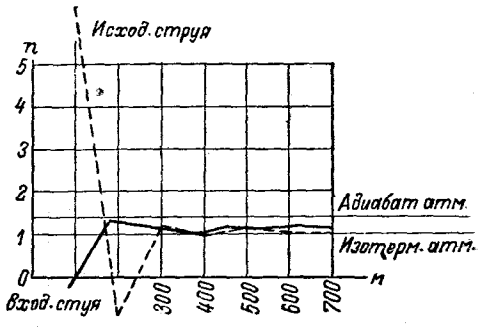


Рис. 5б. Изменение показателя политропы.

Для подсчета депрессии естественной тяги необходимо определить разницу между весом воздуха в стволах AB и CD, а, значит, и приращение давления по каждому из этих столбов. Приращение же давления, как указывалось выше, может происходить по любому закону: по изотерме, однородной атмосфере, адиабатически или, наконец, политропически с любым показателем политропы (от 1,0 до до 1,4). Поскольку разница между результатами, полученными по этим формулам, невелика, — чтобы избежать ошибки от неточности подсчета, вычисление было произведено логарифмированием с использованием шестизначных таблиц логарифмов. Для этого все формулы были предварительно приведены к логарифмическому виду.

Формула адиабатической атмосферы после логарифмирования и подстановки R сухого воздуха 29,27 приняла вид:

$$\lg P_2 = \lg P_1 - 3{,}45 \lg\left(1 + 0{,}0098 \frac{H}{T}\right).$$

Формула для вычисления по политропе отличается от адиабаты лишь коэфициентами:

$$\lg P_2 = \lg P_1 + 5 \lg\left(1 + 0{,}0068 \frac{H}{T}\right).$$

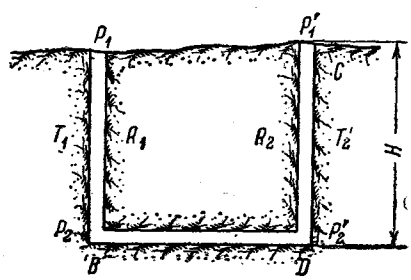


Рис. 6. Схема рудника.

Изотермическая формула ранее была приведена к логарифмическому виду:

$$\lg P_2 = \lg P_1 + 0{,}01484 \frac{H}{T}.$$

За начальное P было принято барометрическое давление в 750 *мм* ртутного столба.

Исходя из последнего, по первым 3 формулам определялось сначала P_2 по его логарифму, а затем по разности $(P_2 - P_1)$ и приращение давления.

Формулу однородной атмосферы

$$(P_2 = P_1 + \gamma H)$$

Таблица 3

Изменение показателя политропы

(ш. Ново-Смольяниновская № 11)

№№ точек	Входящая струя				Исходящая струя				Входящая струя			Исходящая струя		
									n'		n''	n'		n''
	$t°$	Влажн. в %	P, *мм* рт. ст.	R	$t°$	Влажн. в %	P, *мм* рт. ст.	R	R пост. сух. воздуха	R перем. (гр. 5)	R пост. сух. воздуха	R пост. сух. воздуха	R перем. (гр. 9)	R пост. сух. воздуха
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1°	−3,2	—	733,5	—	8,5	92,8	724,0	29,41	−0 4323	—	0,3878	+6,208	6,4354	17,5
1	6,8	61,0	741,0	29,36	11,8	95,2	731,9	29,44	1,2488	1,2488	1,222	−1 604	−1,5806	−0,93
2	7,4	97,2	749,0	29,39	17,4	98,0	738,8	29,51	1,1828	1, 53	1,146	1,2105	1,211	1,181
3	7,8	97,6	757,3	29,40	18,0	98.0	748,8	29,516	1,0709	1,071	1,0664	1,0615	1,062	1,072
4	8,0	98,8	766,0	29,406	18,2	100,0	756,5	29,52	1,1527	1,'54	1,161	1,169	1,17	1,181
5	8,4	98,8	773,9	2),408	18,7	100	765,0	29,525	1,1527	1,1535	1,148	1,095	1,096	1,1098
6	8,8	98 8	782,5	29 41	19,0	100	773,0	29,527	1,1985	1,139	1,195	1,000	1,000	1,000
7	9,3	98,8	791,0	2),40	19,0	100	785,5	29,523	1,1135	1,1109	1,149			
									1,156	1,156	1,55	1,107	1,108	1,109

мы сначала несколько преобразовали, подставив вместо удельного веса его значение $\left(\gamma = 0{,}4645\frac{Pm}{T}\right)$:

$$P_2 - P_1 = 0{,}4645\frac{Pm \cdot H}{T}.$$

Правая часть этого выражения вычислялась помощью логарифмов по формуле:

$$\lg(P_2 - P_1) = \lg 0{,}4645 + \lg Pm - \lg H - \lg T.$$

Изменение давления P для подстановки в формулу было принято условно по адиабате.

По всем четырем формулам подсчеты сделаны для $t = 10°$ и 30° Ц для различных глубин, начиная с 100 до 1000 *м* сначала (до 500 *м*) через 100 *м*, а затем для 700 и для 1000 *м*.

Все результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4

Приращение давления в *мм* ртутного столба

Глуб. в *м*	Адиабата		Политропа		Изотерма		Однор. атм.	
	$t = 10°$	$t = 30°$	$t = 10°$	$t = 30°$	$t = 10°$	$t = 30°$	$t = 10°$	$t = 30°$
100	9,02	8,365	9,04	8,45	9,105	8,502	9,11	8,49
200	18,12	16,914	18,18	16,95	18,34	17,106	18,3	17,15
300	27,26	25,477	27,395	25,65	27,67	25,804	27,625	25,8
400	36,52	34,106	36,885	34,26	37,11	34,60	37,1	34 65
500	45,86	42,80	46,09	43,03	46,69	43,50	46,68	43,6
700	64,725	60,394	65,155	60,776	66,133	61,595	66,0	61,63
1000	93,66	87,315	94,425	88,14	96,175	89,52	96,07	89,7

На диаграмму нанесены два подсчета по однородной атмосфере: с средним P_m и при постоянном P. В таблицу же внесен подсчет лишь при среднем P.

Сравнение в основном, конечно, нужно делать с формулой однородной атмосферы при переменном среднем давлении, так как в этом случае для всех формул при подсчете условно принимаются постоянная температура и изменяющееся по различному закону давление.

Приведенные данные показывают, что разница между приращением давления, подсчитанным по различным формулам, невелика и составляет максимум 3% между крайними значениями по изотерме и однородной атмосфере.

Значения давления по адиабате и однородной атмосфере почти идентичны. Разница между адиабатой и политропой также всего 1%.

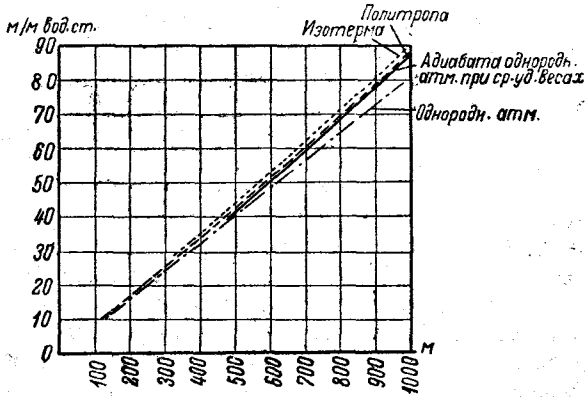


Рис. 7. Депрессия естественной тяги при различных законах расслоения атмосферы.

Депрессия естественной тяги определена, как разница весов столбов (приращений давления) при температурах 10° и 30° и вычислена нами в миллиметрах как ртутного, так и водяного столба.

Результаты даны в табл. 5 и представлены на рис. 7.

Таблица 5

Депрессия естественной тяги

Глубина в *м*	Адиабата		Политропа $n=1,25$		Изотерма		Однор. атм.	
	$\Delta t=20°$		$\Delta t=20°$		$\Delta t=20°$		$\Delta t=20°$	
	мм ртутн. столба	*мм* водян. столба	*мм* ртутн. столба	*мм* водян. столба	*мм* ртутн. столба	*мм* водян. столба	*мм* ртутн. столба	*мм* водян. столба
100	0,655	8,9	0,54	8,2	0,603	8,48	0,62	8,2
200	1,206	16,4	1,23	16,72	1,234	16,76	1,215	16,5
300	1,783	24 2	18,45	25,1	1,866	25,4	1,825	24,83
400	2,403	32,6	2,254	33,1	2,505	34,1	2,45	33,38
500	3,06	41,6	3,06	41,6	3,20	43,6	3,08	42,0
700	4,331	58,8	4,38	59,6	4,56	62,0	4,37	59,43
1000	6,345	86,2	6,386	86,8	6,54	89,0	6,37	86,37

Цифры достаточно убедительно показывают, что разницы в депрессии, подсчитанной по адиабате и политропе, фактически нет, во всяком случае, она в пределах точности подсчета меньше 1%.

Несколько выше цифры изотермической атмосферы; разница между депрессией по изотерме и адиабате порядка 2,5%.

Подсчет по однородной атмосфере дает при подсчете по среднему давлению те же цифры, что и адиабата. При подсчете же по начальному давлению (нижняя кривая рис. 7) результат несколько ниже адиабаты, и разница достигает 7—8%.

Если принять, что закон изменения воздуха происходит по политропе (с определенным выше показателем степени, равным 1,13), то по аналогии с разницей между адиабатой и политропой, с $n=1,25$ (разница $1,4-1,25=0,15$), можно считать, что изотерма дает величину депрессии естественной тяги, отклоняющуюся от истинной лишь на 0,5—1%.

Вообще же говоря, таблица убедительно показывает, что для практических целей депрессию естественной тяги можно вычислять по любой из этих формул: по адиабате, изотерме, по формуле однородной атмосферы и политропе с любым показателем степени.

Поэтому решающее значение при выборе расчетной формулы будет иметь сложность техники подсчета.

Из политропических формул наиболее просто вычисление по формуле изотермической атмосферы; здесь отпадают дополнительное логарифмирование и умножение логарифма на показатель степени, что обязательно при подсчете по политропе и адиабате.

Несложно пользование формулой однородной атмосферы, но недостатком ее является необходимость замера не только температуры, но и давлений. Проще всего вычисление по формуле однородной атмосферы с постоянным начальным давлением, но при этом депрессия естественной тяги будет несколько ниже истинной. В известных случаях, когда не нужно особой точности, подсчет депрессии естественной тяги по этой формуле может быстро дать необходимый результат.

Выясним влияние на величину естественной тяги состава воздуха и метеорологических факторов, пользуясь формулой изотермической атмосферы, так как анализ этой формулы можно произвести наиболее просто и так как эта формула ближе к фактическому расслоению рудничного воздуха, чем, например, формула однородной атмосферы, адиабаты

$$P_2=P_1 e^{H/RT}.$$

Депрессия естественной тяги по изотерме определится как разность веса столба воздуха AB и CD.

Вес столба воздуха AB и CD:

$$\Delta_{AB} = P_2 - P_1 = P_1 e^{H/RT_1} - P_1 = P_1 (e^{H/RT_1} - 1).$$

Вес столба воздуха CD:

$$\Delta_{CD} = P_2^1 - P_1^1 = P_1^1 e^{HR/T_2} - P_1^1 = P_1^1 (e^{H/RT_2} - 1).$$

Депрессия естественной тяги:

$$h_e = \Delta_{AB} - \Delta_{CD} = P_1 (e^{H/RT_1} - 1) - P_1^1 (e^{H/RT_2} - 1).$$

Вообще говоря R для воздуха не постоянно, а зависит от процентного содержания отдельных слагающих воздух газов и от примеси влаги.

Если давление в точках A и C одинаково, $P_1 = P_1^1$, т. е. рудник проветривается только одной естественной тягой, или, если пренебречь уменьшением веса воздуха из-за разрежения (уплотнения) вентилятором, то формулу для депрессии естественной тяги можно упростить:

$$h_e = P_1 (e^{H/R_1T_1} - e^{H/R_2T_2}).$$

При $R = \text{const}$ выражение для естественной тяги можно представить несколько иначе

$$h_e = P_1 e^{H/RT_1} \left[1 - e^{\frac{H}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}\right].$$

Для общего случая, когда для точности подсчета рудник разбивается на ряд отдельных вертикальных участков, формула несколько видоизменится, и в показатель степени для e войдет сумма величин, характеризующих отдельные участки, т. е.

$$h_e = P_1 (e^{\sum \frac{H}{RT_1}} - e^{\sum \frac{H}{RT_2}}).$$

Для выяснения возможности применения постоянных коэфициентов (P_1 и R) необходимо установить влияние на величину депрессии естественной тяги как изменения состава воздуха (R), так и изменения начального давления (P_1).

В первую очередь выясним влияние состава рудничного воздуха, затем давления и, наконец, влияние разницы температур входящего и исходящего воздуха.

Атмосферный воздух нормального состава (по Холдэну) содержит 20,93% O_2; 0,03% CO_2 и 79,04% N_2 по объему.

В руднике воздух теряет часть своего кислорода и обогащается углекислотой и метаном.

Наиболее загрязненный воздух по правилам безопасности должен иметь не меньше 20% O_2 и не больше 1% CO_2 и 1% CH_4.

Как известно из термодинамики, газовая постоянная (число Реньо) представляет величину работы при нагревании 1 *кг* газа на 1° под постоянным давлением. Поскольку воздух представляет смесь различного количества кислорода, азота, углекислоты и водяного пара, очевидно, что и газовая постоянная для воздуха будет величиной условной, подсчитанной для воздуха определенного состава. Так, например, Прандтль дает газовую постоянную для сухого воздуха 29,27, а для воздуха средней влажности 29,4 *м*/град.

Вообще говоря, газовая постоянная может быть определена для воздуха любого состава по уже безусловно постоянным числам Реньо отдельных, содержащихся в воздухе газов.

Этим путем мы и решили пойти, при выяснении пределов изменения газовой постоянной.

За один из пределов были приняты постоянные воздуха, наиболее загрязненного по правилам безопасности: для газовых рудников с содержанием 20% O_2, 1% CO_2, 1% CH_4 и 78% N_2 и для негазовых 20% O_2, 1% CO_2 и 78 N_2, а за второй предел атмосферного воздуха нормального состава.

В рудничном воздухе объем инертных газов всегда определяется по разнице (за вычетом O_2, CO_2 и CH_4) без разделения на составные части, и вся смесь инертных газов обобщается под названием азота. Поэтому, чтобы поставить сравнение в одинаковые условия, мы высчитали на тех же основаниях и газовую постоянную атмосферного воздуха нормального состава.

Газовая постоянная смеси газов определялась по формуле:

$$R = \frac{C_1R_1 + C_2R_2 + C_3R_3}{G},$$

где R — газовая постоянная смеси; C_1, C_2, C_3 — вес отдельных компонентов смеси общим весом G и R_1, R_2, R_3 — газовые постоянные составных частей.

При подсчете за исходные были приняты следующие газовые постоянные: для $O_2 = 26{,}50$ *м*/град., для $N_2 = 30{,}26$, для $CO_2 = 19{,}27$, для $CH_4 = 52{,}9$.

Молекулярные веса взяты следующие: для O_2 — 32, для N_2 — 28,02, для CO_2 — 44,0, для CH_4 — 16,03.

Воздух нормального состава (20,93% O_2, 79,04% N_2 и 0,03% CO_2 по объему) содержит по весу: O_2 — 23,21%, N_2 — 76,74%, CO_2 — 0,05%.

Загрязненный воздух газовых рудников содержит по весу: O_2 — 22,18%, N_2 — 75,74%, CO_2 — 1,52%, CH_4 — 0,56%.

В негазовых рудниках: O_2 — 22,18%, N_2 — 76,30%, CO_2 — 1,5%.

Газовая постоянная для воздуха нормального состава:

$$R = \frac{C_{O_2}R_{O_2} + CN_2RN_2 + C_{CO_2}R_{CO_2}}{G} = \frac{23{,}21 \cdot 26{,}5 + 76{,}74 \cdot 30{,}26 + 0{,}05 \cdot 19{,}27}{100} = 29{,}382.$$ [1]

Газовая постоянная для исходящей струи будет в первом случае:

$$R' = \frac{C_{O_2}R_{O_2} + C_{N_2}R_{N_2} + C_{CO_2}R_{CO_2} + C_{CH_4}R_{CH_4}}{G} =$$

$$= \frac{22{,}18 \cdot 26{,}5 + 75{,}74 \cdot 30{,}26 + 1{,}52 \cdot 19{,}27 + 0{.}56 \cdot 52{,}9}{100} = 29{,}396$$

и во втором случае:

$$R' = \frac{22{,}18 \cdot 26{,}5 + 76{,}3 \cdot 30{.}26 + 1{,}52 \cdot 19{,}27}{100} = 29{,}259.$$

Этот подсчет показывает, что газовая постоянная рудничного воздуха с изменением химического состава меняется очень мало. Отклонения не достигают 0,5% (0,0045% — для первого подсчета и 0,42% для второго).

Подсчеты показывают, что изменение химического состава не может оказать сколь-либо заметного влияния на депрессию естественной тяги.

Несколько больше влияние влажности воздуха. Газовая постоянная влажного воздуха зависит от веса содержащихся в воздухе водяных паров, последний же меняется как с изменением относительной влажности воздуха, так и с изменением температуры. Нами для характеристики изменения газовой постоянной рудничного воздуха различной влажности и температуры были произведены подсчеты газовой постоянной входящего и исходящего воздуха для одного из обследований, проведенных в стволах шахты Смолянка № 11.

Для вычисления газовой постоянной мы воспользовались выражением газовой постоянной (*3*), выводимым из закона Авогадро:

$$R = \frac{848}{M}.$$

При пользовании этой формулой необходимо, чтобы молекулярный вес газа, для которого определяется постоянная, был определен при весе кислорода = 32.

[1] Разница с ранее приведенной цифрой 29,27 объясняется тем, что мы благородные газы подсчитали за азот.

Молекулярный вес влажного воздуха, состоящего из: $\frac{Pd}{M}$ частей водяного пара и из $\left(1-\frac{Pd}{P}\right)$ частей сухого воздуха, будет равен:

$$M=\frac{Pd\,M_2}{P}+\left(1-\frac{Pd}{P}\right)M_1=\frac{Pd}{P}\cdot 18{,}016+\left(1-\frac{Pd}{P}\right)28{,}95.$$

Здесь Pd упругость водяных паров; P — барометрическое давление; M_1 — молекулярный вес сухого воздуха $=28{,}95$, M_2 — молекулярный вес водяного пара $=18{,}016$.

По преобразовании получается формула:

$$M=28{,}95-10{,}93\,\frac{Pd}{P}\cdot$$

Окончательное выражение для газовой постоянной влажного воздуха:

$$R=\frac{848}{28{,}95-10{,}93\,\frac{Pd}{P}}\cdot$$

Предварительно необходимо по относительной влажности, замеренной психрометром, и сухой температуре воздуха определить упругость водяных паров. Для вычисления ее существует следующая формула:

$$Pd=\varphi P_s.$$

Здесь φ — относительная влажность, а P_s — упругость насыщенных при данной температуре водяных паров.

Как показывает табл. 3 (стр. 96), воздух почти по всей шахте насыщен водяными парами, поэтому газовая постоянная значительно выше газовой постоянной для сухого воздуха, разница же между влажностью входящего и исходящего воздуха невелика, в среднем $R=29{,}4$ для входящего воздуха и 29,5 для исходящего.

Таким образом, в данном случае влияние влаги ничтожно. Максимальным влияние влажности будет тогда, когда входящий воздух будет совершенно сухим ($R=29{,}27$), а исходящий насыщен влагой ($R=29{,}52$). Разность в весе воздуха в этом случае будет максимальной; определим для этого случая величину естественной тяги, вызываемой различной влажностью воздуха.

Ранее приведенную формулу для вычисления депрессии естественной тяги можно представить в виде:

$$h_e=P_1\left(e^{H/R_1T_1}-e^{H/R_2T_2}\right)=P'e^{H/R_1T_1}\left\{1-e^{H/R_2T_2-H/R_1T_1}\right\}.$$

Если условно принять $P=10\,000$ *мм* водяного столба (стандартная атмосфера), то

$$h_e=10\,000\,e^{H/R_1T_1}\left\{1-e^{H\left(\frac{1}{R_2T_2}-\frac{1}{R_1T_1}\right)}\right\}.$$

При $T=\text{const}$ естественная тяга будет зависеть только от разницы газовой постоянной входящего и исходящего воздуха:

$$h_e=10\,000\,e^{H/R_1T_1}\left\{1-e^{H/T\left(\frac{1}{R_2}-\frac{1}{R_1}\right)}\right\}.$$

Если принять $R_2=29{,}53$ *м*/град. и $R_1=29{,}27$ *м*/град., то получим:

$$h_e=10\,000\,e^{H/29{,}27\cdot T}\left\{1-e^{0{,}0003\,H/T}\right\},$$

при $H=1000$ *м* и $T=290°$ $(+17°)$:

$$h_e=10\,000\,e^{0{,}12}\left\{1-e^{0{,}0011}\right\}=12{,}5\ \textit{мм}\ \text{вод. ст.}$$

Для 700 *м* $h_e\cong 8$ *мм*.

Как показывают приведенные подсчеты, увлажнение воздуха фактически не может вызвать ощутительной естественной тяги.

При этом нужно иметь в виду, что подсчет произведен для теоретического случая, когда в одном стволе воздух абсолютно сухой, а в другом полностью насыщен влагой, поэтому дает максимальные значения естественной тяги. Практически эти цифры будут еще меньше, так как между влажностью входящего и исходящего воздуха редко наблюдается такая разница; наблюдения показывают, что, как правило, воздух во входящей шахте быстро насыщается, а на исходящей струе почти всегда насыщен. [1]

Поэтому можно признать, что депрессия естественной тяги, вызываемая разницей состава воздуха (загрязнение и влажность), настолько мала, что ее без особого отклонения от истины можно не учитывать. Для уменьшения же ошибки от такого упрощения следует признать целесообразным считать газовую постоянную равной не 29,27, а 29,4—29,5 *м*/град. В этом случае ранее вычисленная формула примет вид:

$$\lg h = \lg P_1 + 0{,}01475^{H/T}.$$

Переходим к барометрическому давлению.

Роль барометрического давления при равенстве давлений в начальной точке входящей и исходящей струи (вентилятор не работает) незначительна.

Формула

$$h_e = P\left(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2}\right)$$

показывает, что депрессия естественной тяги прямо пропорциональна начальному давлению, т. е. при отклонении давления от нормального даже на 50 *мм* рт. ст. депрессия естественной тяги изменится всего на $6{,}5\%\left(\frac{50}{750}\cdot 100\right)$, т. е. на величину, значительно меньшую, чем точность замеров и подсчетов.

Иное положение, когда на одной из шахт работает вентилятор; начальное давление в этом случае по обоим стволам будет различным, и вес столба воздуха в одной шахте может значительно отличаться от веса столба воздуха в другой шахте даже при равенстве температур.

В этом случае такую разницу начальных давлений необходимо учитывать и естественную тягу нужно определять по формуле:

$$h_e = P_1\left(e^{H/RT_1} - 1\right) - P_1^1\left(e^{H/RT_2} - 1\right).$$

Заменим $P_1^1 = P_1 - h_v$.

Тогда $h_e' = P_1\left(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2}\right) - h_v\left(e^{H/RT_2} - 1\right)$.

Вычитая из настоящего выражения обычную формулу для подсчета депрессии естественной тяги $[h_e = P_1 \cdot (e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2})]$, составленную по условию постоянства давлений в устье обоих стволов, получим избыточную депрессию, создаваемую разрежением вентилятора (естественную тягу искусственно создаваемую — h_e^v)

$$h_e^v = h_e' - h_e = h_v\left(e^{H/RT_2} - 1\right).$$

Для упрощения анализа представим h_v в виде части начального давления

$$h_v = KP_1,$$

тогда

$$h_e^v = KP_1\left(e^{H/RT_2} - 1\right).$$

Эта депрессия даже при небольшом значении K может достигать большой величины, поскольку абсолютное приращение давления с глубиной $[P_1 = (e^{H/RT_2} - 1)]$ может составить до 80 *мм* рт. ст. (при глубине 1000 *м*).

---

[1] К такому выводу приводят как приведенные нами обследования для замера естественной тяги, так и материалы, полученные во время обследования углекислотного режима угольных рудников Союза.

Величина $(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2})$ может быть в отдельных случаях даже меньше, чем $(e^{H/RT_2} - 1)$, т. е. искусственно создаваемая естественная тяга может значительно превосходить тягу, образующуюся в результате разницы температур.

Попытаемся определить величину искусственно создаваемой естественной тяги. Примем разницу между давлением в подающей воздух шахте и выдающей (в канале вентилятора) максимальной 3%, что соответствует депрессии вентилятора в 300 *мм* вод. ст. В этом случае $K = 0{,}03$ (300 *мм* вод. ст. = 22,5 *мм* рт. ст.; $\frac{22{,}5}{750} = 0{,}03$).

Максимальная вычисленная нами (ш. Смолянка, глубиной 700 *м*) депрессия естественной тяги равнялась (без учета разрежения вентилятора) 30 *мм* вод. ст. (2,25 *мм* рт. ст. при нормальном барометрическом давлении = 750 *мм*). Для этого случая:

$$(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2}) = 0{,}003,$$

$$e^{H/RT_1} = 1{,}088, \quad e^{H/RT_2} = 1{,}085.$$

Для тех же условий величина $(e^{H/RT_2} - 1)K$ будет равна $(1{,}085 - 1)\ 0{,}03 = 0{,}0025$. Этому соответствует депрессия искусственно создаваемой естественной тяги, равная 1,78 *мм* рт. ст. или 24 *мм* вод. ст.

Этот подсчет показывает, что искусственно создаваемая естественная тяга может достигать значительных размеров и что ею нельзя пренебрегать при подсчетах.

При работе вентилятора разрежение, создаваемое вентилятором, не сохранится постоянным по всей исходящей струе, а будет постепенно уменьшаться за счет потери депрессии на трение рудничного воздуха о стенки выработки. С другой стороны, и по входящей струе по мере приближения к вентиляционной шахте на плотности воздуха будет отражаться постепенно возрастающая депрессия вентилятора (при компрессии положение не меняется). Поэтому в приведенную формулу необходимо ввести какие-то дополнения.

Разобранные выше условия, когда депрессия вентилятора не теряется с глубиной, возможны лишь при отсутствии движения воздуха, например, при определении депрессии естественной тяги непосредственным замером, когда вся воздушная струя перекрыта перемычкой, а вентилятор работает. В этом случае разница давлений по обе стороны перемычки дает полную депрессию, состоящую из депрессии вентилятора и естественной тяги.

Разница между полной депрессией и депрессией вентилятора дает как раз сумму депрессии собственно естественной тяги и естественной тяги, искусственно образующейся, определяемой по приведенной выше формуле:

$$h_e = P_1(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2}) - h_v(e^{H/RT_2} - 1).$$

По выключении вентилятора мы замером определим депрессию собственно естественной тяги (от разницы температур и состава воздуха) $h_e = P_1(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2})$.

Разница между этими отсчетами и дает дополнительную депрессию естественной тяги, получаемую в результате работы вентилятора, — искусственно создаваемую естественную тягу.

При движении воздуха депрессия постепенно поглощается сопротивлением выработок, и разница между давлением воздуха входящей и исходящей струи будет постепенно сглаживаться, пока не дойдет до нуля в последней точке замера.

Очевидно, что при подсчете естественной тяги при работе вентилятора по приведенной формуле неизбежна некоторая ошибка.

Попытаемся вывести более точную формулу, учитывающую потерю депрессии в выработках.

Акад. А. А. Скочинский дает следующую формулу для подсчета естественной тяги, образующейся в стволах:

$$h_e = \{P_c^m - (P - \Delta p)e^n\}$$

(Вентиляция рудников, „О методологии аналитического определения вентиляционного сопротивления рудников подсчетом", стр. 15), здесь $m=\frac{H-H_1}{RT_1}$, $n=\frac{H+H_2}{RT_2}$, H_1 и H_2 — сопротивления стволов шахт движению воздуха, выраженные в *м* столба воздуха.

Пользуясь принятыми нами ранее обозначениями, получим

$$h_e=P_1 e^{\frac{H-H_1}{RT_1}}-(P_1-KP_1)e^{\frac{H+H_2}{RT_2}}$$

Заменим H_1 через $\xi_1 H$ и H_2 через $\xi_2 H$ и определим чему равны коэфициенты ξ_1 и ξ_2.

Для этого необходимо возвратиться несколько назад к выводу формулы для подсчета естественной тяги.

Условия равновесия элементарного объема воздуха в шахте при учете депрессии выработок будут следующие:

$$A(\gamma dh+P)=\left\{P+dP\pm\frac{aNQ^2}{13{,}5\cdot S^3}dh\right\}A$$

одночлен $\frac{aNQ^2}{13{,}5\cdot S^3}dh$ представляет депрессию выработки на участке dh и учитывает потерю (приращение) давления на трение воздуха о стенки выработки. Здесь Q — количество воздуха, N — периметр выработки (в отличие от P, которым мы обозначаем давление), S — площадь, α — коэфициент сопротивления, 13,5 — удельный вес ртути (переход от миллиметров вод. ст. к ртутному столбу), dh — длина (глубина) выработки. При наклонной выработке вместо dh пришлось бы ввести $\frac{dh}{\sin\alpha}$.

Из всех перечисленных коэфициентов от давления будет зависеть только α, так как

$$\alpha=\frac{\beta\gamma}{2g},$$

где γ — удельный вес воздуха, β — эмпирический коэфициент, g — ускорение силы тяжести.

Подставляя $\frac{\beta\gamma}{2g}$ вместо α, получим дополнительный член правой части равенства в виде

$$\frac{\beta\gamma}{2g}\cdot\frac{NQ^2}{13{,}5\cdot S^3}dh,$$

или, заменяя

$$\frac{\beta}{2g}\cdot\frac{NQ^2}{13.5\cdot S^3}\text{ через }\xi,\text{ получим }\xi\gamma dh.$$

Тогда условие равновесия перепишется в виде

$$A(\gamma dh+P)=(P+dP\pm\xi\gamma dh)A.$$

Преобразуя, получим

$$\gamma(1\pm\xi)dh=dP.$$

Далее

$$dh=\frac{dP}{(1\pm\xi)\gamma};\quad dh=\frac{1}{(1\pm\xi)}\int\frac{dP}{\gamma}.$$

Подставляя вместо γ равную ему $\frac{P}{RT}$ (изотермическая атмосфера) и интегрируя, получим

$$H=\frac{RT}{(1\pm\xi)}\ln\frac{P_2}{P_1}$$

или

$$\ln\frac{P_2}{P_1}=\frac{H(1\pm\xi)}{RT},$$

откуда

$$P_2 = P_1 e^{\frac{H(1\pm\xi)}{RT}},$$

где

$$\xi = 0{,}0036\ \frac{\beta P Q^2}{S^3},$$

здесь мы перешли к общепринятому обозначению периметра.

Величина естественной тяги при этом будет равна [1]

$$h_e' = P_1 e^{\frac{H(1\mp\xi_1)}{RT}} - P_1 e^{\frac{H(1\pm\xi_2)}{RT_2}} - h_v e^{\frac{H(1\pm\xi_2)}{RT_2}}$$

искусственно образуемая естественная тяга будет равна:

$$h_e^v = h_e' - h_e = P_1 \left\{ e^{\frac{H(1\mp\xi_1)}{RT_1}} - e^{\frac{H(1\pm\xi_2)}{RT_2}} \right\} - h_e e^{\frac{H(1\pm\xi_2}{RT_2}} - P_1 \left(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2}\right).$$

Преобразуя, получим

$$h_e' - h_e = P_1 \left[\left(e^{\frac{H(1\pm\xi_1)}{RT_1}} - e^{\frac{H(1\pm\xi_2)}{RT_2}} \right) - \left(e^{H/RT_1} - e^{H/RT_2}\right) \right] - h_v e^{\frac{H(1\pm\xi_2)}{RT_2}}.$$

Чем меньше будет ξ, тем больше будет величина искусственно получаемой естественной тяги. При ξ_1 и ξ_2 очень близких к 0 можно пользоваться ранее приведенной формулой, учитывающей разрежение вентилятора, но не учитывающей потерю депрессии от сопротивления выработок при движении воздуха.

В самом деле, при ξ_1 и ξ_2 равных 0 величина, стоящая в квадратных скобках, обращается в нуль и остается избыточная депрессия, соответствующая остановке вентилятора:

$$h_v e^{H/RT_2}.$$

Пользование полной формулой требует обязательного определения для всех выработок величины ξ, т. е. замеров периметра, сечения выработки и количества воздуха (коэфициенты β можно условно принять из нормативных материалов по средним цифрам). В показателе степени при подсчете по участкам очевидно должно стоять $\sum \frac{H(1\pm\xi)}{RT}$.

В обычных случаях, когда не нужно стремиться к особенно точному подсчету депрессии естественной тяги, можно, пользуясь формулой изотермической атмосферы, определить лишь пределы, в которых должна находиться депрессия естественной тяги, произведя сначала подсчет без учета разрежения вентилятора (нижний предел), а затем с учетом влияния депрессии вентилятора, но без учета потери депрессии от сопротивления выработки (верхний предел). Истинное значение будет где-либо в середине.

Наконец, в зависимости от характера рудничных выработок, можно остановиться на одной из этих формул; например для рудников, главное нарастание глубины которых дают стволы, можно заведомо пользоваться вторым методом, так как потеря депрессии в стволах, как правило, незначительна.

Правильность этого положения очевидна, поскольку обычно даже для крупных рудников депрессия для стволов даже значительной глубины обычно не превосходит 10—15 *мм* вод. ст. или 1 *мм* рт. ст., т. е. 0,15% нормальной атмосферы.

Такое уменьшение давления фактически совершенно не скажется на удельном весе воздуха.

Повидимому, влияние уменьшения разрежения за счет сопротивления выработок не должно иметь значений почти для всех каменноугольных рудников, поскольку сопротивление последних складывается главным образом из штреков, т. е. горизонтальных выработок, не влияющих на величину естественной тяги.

---

[1] Верхний знак при всасывающем проветривании, нижний при нагнетательном.

Если же мы имеем значительно развитые уклонные работы при сравнительно небольшой длине штреков, то в этом случае, возможно, ближе будет отвечать истинному положению первый метод подсчета (без учета разрежения).

Исходя из необходимости учета разрежения, создаваемого вентилятором, для подсчета депрессии естественной тяги существующих рудников со сложной конфигурацией и преобладающим характером наклонных выработок, надо пользоваться формулой однородной атмосферы, так как при этом методе во всех точках замеряется давление, и подсчет сразу дает полную депрессию естественной тяги с учетом „искусственно создаваемой".

Выясним зависимость естественной тяги от основного ее источника — от температуры. Формулу

$$h = P_1\left(e^{\sum \frac{H}{RT_1}} - e^{\sum \frac{H}{RT_2}}\right)$$

можно преобразовать:

$$h = P_1 e^{\sum \frac{H}{RT_1}}\left(1 - e^{\sum \frac{H}{RT_2} - \sum \frac{H}{RT_1}}\right).$$

Из этого выражения можно видеть, что депрессия меняется не только с изменением разницы температуры (T_2 и T_1), но и с абсолютным ее изменением (T_1).

Для выяснения влияния абсолютного значения температуры и температурного перепада нами подсчитаны давления для различных глубин при температурах воздуха в 0, 10, 20 и 30° Ц и при начальном давлении 10 000 *мм* вод. ст. или 735,5 *мм* рт. ст. По ним были найдены депрессии естественной тяги при средней температуре входящего воздуха в 0, 10 и 20° и при перепаде между температурами входящего и исходящего воздуха в 10°.

Таблица 6

Депрессия естественной тяги при разных температурах и глубинах

Глубина в *м*	Давление в *мм* вод. ст.				Депр. ест. тяги в *мм* вод. ст.		
	$t=0°$	$t=10°$	$t=20°$	$t=30°$	0—10°	10—20°	20—30°
100	10125,95	10121,4	10117,3	10113,4	4,55	4,1	3,9
200	10253,45	10244,30	10236,0	10238,1	9,15	8,30	7,9
300	10382,65	10368,9	10356 1	10314,05	13,75	12,80	12,05
400	10513,42	10494,7	10477,6	10461,4	18,72	17,1	16,2
500	10645,9	10622,75	10600,5	10580,0	23,15	21,25	20,5
700	10915,7	10881,8	10850,6	10821,3	33,9	31,2	29,3
1000	11333,4	11282,35	11237,0	11194,6	51,05	45,35	42,04
Средняя депрессия на 100 *м*		при глуб. до 700 *м*			4,69	4,35	4,09
		„ „ до 1000 *м*			4,82	4,41	4,12

Табл. 6 и диаграмма (рис. 8) показывают, что значение абсолютных величин температур невелико и что в основном на депрессии сказывается перепад температур.

Это объясняется, конечно, тем, что пределы колебания абсолютных температур всего 10% (273 – 303°), тогда как разница между температурой входящего воздуха может увеличиваться и уменьшаться во много раз.

Кроме этого приведенные цифры показывают, что для ориентировочных подсчетов, в особенности в проектах, когда перепад температур не может быть точно определен, можно быстро подсчитать депрессию естественной тяги глубоких рудников (без учета разрежения вентилятора), принимая депрессию естественной тяги (до глубины 700 *м*) равной = 4,2—4,7 *мм* водяного столба на каждые 100 *м* глубины при перепаде температур в 10° (0,42—0,47 *мм* на 1° перепада). При

начальной температуре воздуха в пределах между 10 и 30° нужно считать 4,2 *мм* на 100 *м* и при начальной температуре в пределах между 0 и 10° — 4,7 *мм*. Таким образом, депрессию естественной тяги можно подсчитать по формулам:

$$h_e = 0{,}42\,\Delta t H/100 \text{ для } t \text{ от } 10 \text{ до } 30°$$

и

$$h_e = 0{,}47\,\Delta t H/100 \text{ для } t \text{ от } 0 \text{ до } 10°,$$

здесь Δt — температурный перепад. Ошибка при подсчете по этим формулам не будет превышать 5%.

Если еще поступиться точностью, то можно эти формулы объединить в одну со средним коэфициентом 0,45:

$$h_e = \frac{0{,}45\,\Delta t H}{100},$$

здесь ошибка может достигать 10—15%.

В тех случаях, когда необходимо свести ошибку к минимуму для каждого участка, нужно подбирать свой коэфициент. Значения таких коэфициентов приведены нами в табл. 7 через 2° С; они представляют депрессию естественной тяги (в миллиметрах вод. ст.), образующуюся при глубине в 100 *м* и перепаде температур $\Delta t = 10°$.

Таблица 7

$t°$	$10K$	$t°$	$10K$	$t°$	$10K$	$t°$	$10K$
0°	4,69	6	4,47	12	4,29	18	4,13
2	4,62	8	4 41	14	4,23	20	4,09
4	4,55	10	4,35	16	4,18		

На диаграмме (рис. 8) построены кривые депрессии естественной тяги до глубины 1000 *м* для разных температур, по этим кривым можно непосредственно получить депрессию естественной тяги.

Если перепад температур с глубиной не сохраняется, то подсчет нужно вести не сразу для всей глубины, а по участкам и формулу упрощенного подсчета нужно представить в виде

$$h_e = \sum K \Delta t H,$$

где K — коэфициент из табл. 7.

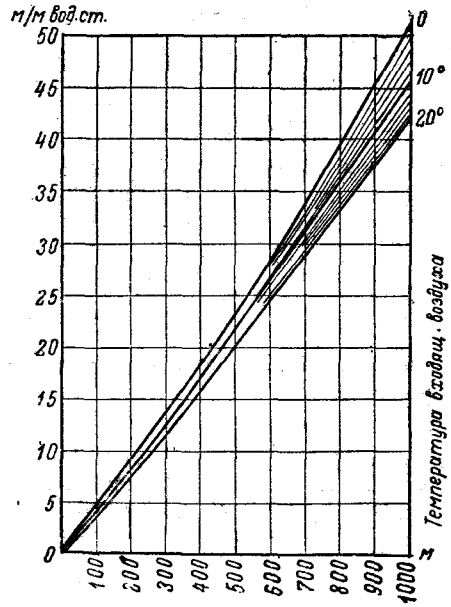


Рис. 8. Депрессия естественной тяги (при разнице между t входящего и исходящего воздуха $\Delta t = 10°$).

Выводы

1. Изменение состояния воздуха в подземных выработках происходит по сложному закону, который не может быть точно выражен ни одним из известных законов расслоения воздуха.

Наряду с участками устойчивого равновесия воздушного потока встречаются участки безразличного равновесия и неустойчивого.

Участки неустойчивого равновесия свойственны верхней части вертикальных выработок; на эти участки при подсчете естественной тяги и должно быть обращено наибольшее внимание.

Устойчивость воздушного потока может служить некоторым показателем интенсивности проветривания диффузией. Теоретические и исследовательские работы в этой до сих пор мало изученной отрасли должны принести много интересного.

2. Сравнительные подсчеты показывают, что, несмотря на неопределенность фактического расслоения воздуха в шахтных выработках, практически для определения давления воздуха и естественной тяги можно пользоваться любым из известных в метеорологии законов (однородная атмосфера, изотерма, адиабата).

3. Основным источником естественной тяги в руднике является перепад между температурой входящего и исходящего воздуха.

На депрессии естественной тяги почти совершенно не сказываются изменение химического состава воздуха, его влажность и барометрическое давление на поверхности.

Изменение температуры при неизменном перепаде между температурами входящего и исходящего воздуха может вызвать колебания естественной тяги в 15% от ее депрессии (при изменении от $0-20°$).

Разрежение вентилятора может создавать значительную дополнительную тягу.

4. Подсчет естественной тяги действующих рудников лучше всего производить по формуле однородной атмосферы (с замерами t, P) $P_2 = P_1 + \gamma H$, так как этим методом одновременно определяется естественная тяга, образующаяся как за счет изменения физического состояния воздуха, так и в результате разрежающего (уплотняющего) действия вентилятора.

5. При проектировании естественную тягу легче подсчитать по формуле изотермической атмосферы $\lg P_2 = \lg P_1 + \frac{H}{MRT}$, так как для этого нужно меньше исходных данных.

Для большей точности подсчетов следует рудничный воздух считать не сухим, а влажным, близким к насыщению, т. е. газовую постоянную (R) принимать равной 29,4—29,5. В этом случае

$$\lg P_2 = \lg P_1 + 0{,}01475^{H/T}.$$

5. При подсчетах необходимо учитывать искусственно образуемую естественную тягу. Для глубоких рудников, вскрываемых вертикальными шахтами без длинных уклонов, эту дополнительную естественную тягу можно определить по формуле:

$$h_e^v = h_v\left(e^{\frac{H}{RT}} - 1\right).$$

В тех случаях, когда потеря депрессии в выработках, вызывающих основную депрессию естественной тяги, велика (уклоны), более точные результаты дает развернутая формула, в пользовании которой для каменноугольных рудников, вскрываемых вертикальными шахтами, нет практической необходимости.

6. Для грубых подсчетов, в проектах, можно подсчет естественной тяги вести по формуле

$$h_e = \sum K \Delta t H,$$

пользуясь постоянными (0,42; 0,47 или 0,45) или переменными (по табл. 7) коэфициентами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проф. Протодьяконов. Курс проветривания рудников. Изд. 1930 г.
2. Виллет. Очерк динамической метеорологии, стр. 18. Изд. 1932 г.
3. Грюнвальд. Центробежные вентиляторы, стр. 33, т. I, изд. 1933 г. стр. 647.

Zusammenfassung

1. Die Veränderung der Beschaffenheit von Grubenwetter folgt dem komplizierten Gesetze, welches keinen pünktlichen Ausdruck hat und keinem gewussten Gesetze von der bandweisen Lufttrennung unterworfen ist. Nebst den Abteilungen, wo ein stabiles

Gleichgewicht der Luftströmung ist, hat man auch die Abteilungen mit indifferentem und unsicherem Gleichgewicht. Die Abteilungen mit unsicherem Gleichgewicht sind in den Teilen der seigeren Grubenbaue zu finden. Diese Abteilungen während der Berechnung des natürlichen Zuges müssen in grosse Acht genommen werden.

2. Die vergleichende Berechnungen zeigen, dass man, trotz der Unbestimmtheit der realen Schichtentrennung in den Grubenbauen, für die Bestimmung des Luftdruckes und des natürlichen Wetterzuges praktisch das beliebige Gesetz von Meteorologie (gleichartige Atmosphäre, Isotherme, Adiabate) benutzen kann.

3. Die Hauptquelle des natürlichen Wetterzuges in der Grube ist die Wärmegefülle der ein- und ausziehenden Luft.

Die Veränderung der chemischen Zusammensetzung von Wetter, die Feuchtigkeit und der Barometerstand über Tage haben fast keine Influenz auf die Depression des natürlichen Wetterzuges.

Die Veränderung von Temperatur bei dem unveränderlichen Wärmegefülle zwischen der ein-und ausziehenden Luft kann die Schwankungen von natürlichem Zuge um 15% der Depression hervorrufen (Veränderung von O bis 20°).

Der Unterdruck vom Ventilator kann einen ergänzenden Zug hervorrufen.

4. Die Berechnung von natürlichem Zuge in existierenden Gruben besser nach der Formel der gleichartigen Atmosphäre (mit den Messungen t, P) $P_2 = P_1 + \gamma H$ zu erfüllen, weil mittels dieser Methode gleichzeitig den natürlichen Wetterzug bestimmt, der im Resultate der Veränderung des physikalischen Zustandes der Luft und wegen des Unterdruckes (Überdruckes) des Ventilators entsteht.

5. Beim Projektieren ist es leichter den natürlichen Wetterzug nach der Formel der isothermischen Atmosphäre $\lg P_2 = \lg P_1 + \frac{H}{MRT}$ zu bestimmen, weil für solche Berechnung weniger Daten nötig sind.

Für die grössere Genauigkeit der Berechnungen muss man das Grubenwetter nicht trocken, sondern feucht, nah der Sättigung, haben, d. h. Gaskonstante R gleich 29,4 — 29,5 annehmen.

In diesem Falle $\lg P_2 = \lg P_1 + 0{,}0147 \frac{H}{T}$.

6. Bei den Berechnungen ist es nötig den künstlichbildenden natürlichen Wetterzug zu berücksichtigen. Für die tiefe Gruben, wo man mit den seigeren Schächten ohne lange Fallende aufschliesst, diesen ergänzenden natürlichen Wetterzug kann man nach der folgenden Formel ermitteln:

$$h_n = h_v (e^{\frac{H}{RT}} - 1).$$

In jenen Fällen, wo Depressionsverlust in den Grubenbauen, welche Hauptdepression von natürlichem Zuge hervorrufen, ist gross (Fallende), die genauere Resultate giebt die entwickelte Formel, welche für die Kohlengruben, die mit den seigeren Schächten aufgeschlossen werden, praktisch unnötig sind.

Für die annähernden Berechnungen in den Projekten kann man den natürlichen Wetterzug, benutzend die Konstante (0,42; 0,47 oder 0,45) oder veränderliche (Tab. 7) Koeffiziente, nach der Formel

$$h_n = \sum k \Delta t H$$

ermitteln.