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

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВВОДА ПОДОГРЕТОГО ВОЗДУХА, ПОСТУПАЮЩЕГО В ШАХТНЫЙ СТВОЛ ИЗ КАЛОРИФЕРНЫХ КАНАЛОВ

Доц. Л. П. Северин

Предлагаемая работа посвящена рассмотрению условий ввода в шахтные стволы вентиляционного воздуха, подогреваемого в зимнее время рудничными калориферными установками.

При этом имеется в виду всасывающая система рудничной вентиляции, которой сопутствует наличие у воздухоподающего ствола калориферной установки с собственным вентилятором и подземным калориферным каналом. Главный рудничный вентилятор при такой системе проветривания располагается у вентиляционного ствола.

В работе раздельно рассматриваются условия ввода подогретого воздуха в вертикальный и наклонный шахтные стволы.

Вертикальный шахтный ствол

При вентиляции рудника основная масса холодного атмосферного воздуха с температурой $t_{нар}$ поступает через устье воздухоподающего ствола, где и смешивается с воздухом, подогретым в калориферах до температуры $t_{под}$. Подогретый воздух вводится в шахтный ствол через окна подземного калориферного канала особым вентилятором, обеспечивающим одновременно принудительное движение воздуха через калориферы.

Само собой разумеется, что смешивание подогретого и холодного вентиляционного воздуха должно происходить возможно ближе к земной поверхности, так как в этом случае произойдет наиболее эффективное обогревание устья ствола калориферной установкой. Наряду с этим необходимо обеспечить такие условия ввода подогретого воздуха в шахтный ствол, при которых не происходило бы выбивание горячей струи воздуха из устья в надшахтное здание.

Движение частицы воздуха по выходе его из окна калориферного канала (рис. 1) определяется тремя факторами.

1. Частица горячего воздуха стремится двигаться в направлении оси окна со скоростью v_1.

2. Частица подхватывается потоком холодного воздуха, поступающего в шахтный ствол с поверхности, со скоростью v_0.

3. На частицу действует постоянная сила P, обусловленная разностью весов холодного и горячего воздуха и направленная вертикально вверх [1].

Из этих трех факторов наиболее просто определяется второй.

Зная заранее общее количество вентиляционного воздуха, поступающего в рудник, и количество воздуха, подогреваемого в калориферах, легко узнать и объем холодного воздуха $Q_{хол}$, поступающего через устье ствола. Известной заранее является также площадь поперечного сечения воздухоподающего шахтного ствола $F_{шах}$.

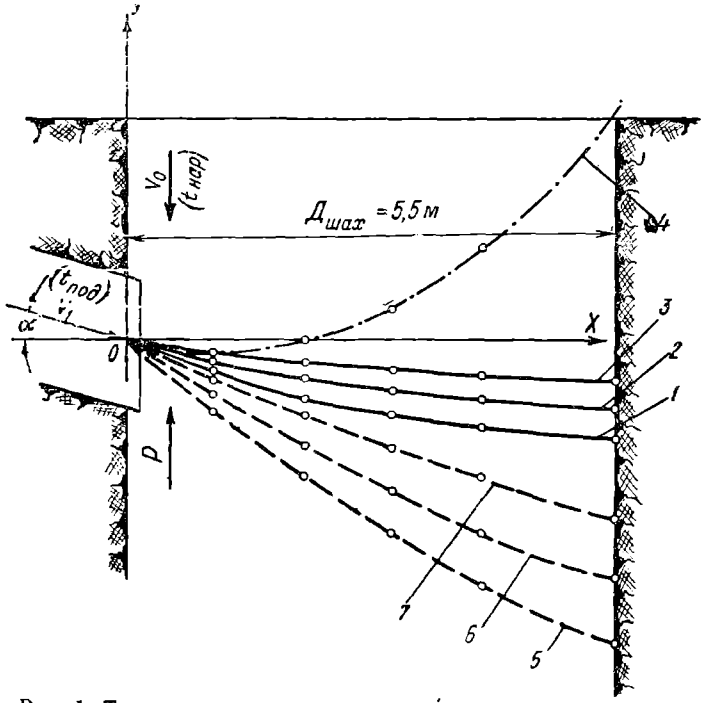


Рис. 1. Траектории движения подогретого воздуха в вертикальном шахтном стволе

Значение v_0 является частным от деления величины $Q_{хол}$ на $F_{шах}$, т. е.

$$v_0 = \frac{Q_{хол}}{F_{шах}} \ м/сек. \qquad (1)$$

Вывод формулы для вычисления силы P можно произвести на основе следующих соображений.

Предположим, единица объема Q заполнена либо только холодным, либо только горячим воздухом.

Тогда вес холодного воздуха, заключенного в этом объеме, будет

$$G_{нар} = m_{нар} g \ кг, \qquad (а)$$

а вес подогретого воздуха

$$G_{пол} = m_{под} g \ кг, \qquad (б)$$

где $m_{нар}$ и $m_{под}$ — массы воздуха, заключенные в единице объема соответственно при температурах $t_{нар}$ и $t_{под}$;

$g = 9{,}81 \ м/сек^2$ — ускорение силы тяжести.

Из определения следует, что на частицу воздуха в шахтном стволе действует постоянная сила P, равная разности весов холодного и подогретого воздуха

$$P = G_{\text{нар}} - G_{\text{под}}$$

или, согласно (а) и (б),

$$P = (m_{\text{нар}} - m_{\text{под}})\, g. \tag{в}$$

Но

$$m_{\text{нар}} = \frac{G_{\text{нар}}}{g} = \frac{Q\gamma_{\text{нар}}}{g} \tag{г}$$

$$m_{\text{под}} = \frac{G_{\text{под}}}{g} = \frac{Q\gamma_{\text{под}}}{g}, \tag{д}$$

где $\gamma_{\text{нар}}$ и $\gamma_{\text{под}}$ — объемные (удельные) веса воздуха при $t_{\text{нар}}$ и $t_{\text{под}}$

Если через γ_0 обозначить удельный вес воздуха при температуре $t_0 = 0°$, то при неизменном давлении будут справедливы следующие соотношения

$$\gamma_{\text{нар}} = \gamma_0 \frac{1}{1 + \alpha t_{\text{нар}}} \tag{е}$$

$$\gamma_{\text{под}} = \gamma_0 \frac{1}{1 + \alpha t_{\text{под}}}, \tag{ж}$$

где $\alpha = \frac{1}{273}$ — коэффициент объемного расширения газов.

Подставив (е) и (ж) соответственно в (г) и (д), получим

$$m_{\text{нар}} = \frac{Q\gamma_0}{g(1 + \alpha t_{\text{нар}})}, \tag{з}$$

$$m_{\text{под}} = \frac{Q\gamma_0}{g(1 + \alpha t_{\text{под}})} \tag{и}$$

Совместное решение двух последних уравнений дает следующее соотношение

$$m_{\text{нар}} = m_{\text{под}} \frac{1 + \alpha t_{\text{под}}}{1 + \alpha t_{\text{нар}}} \tag{к}$$

Подставляя полученное значение $m_{\text{нар}}$ в выражение (в), получим окончательную формулу для определения силы P,

$$P = m_{\text{под}} g A_{\text{т}}, \tag{2}$$

где

$$A_{\text{т}} = \frac{1 + \alpha t_{\text{под}}}{1 + \alpha t_{\text{нар}}} - 1 = \frac{\alpha T_{\text{под}}}{\alpha T_{\text{нар}}} - 1 = \frac{T_{\text{под}} - T_{\text{нар}}}{T_{\text{нар}}} \tag{3}$$

Здесь $T_{\text{под}}$ и $T_{\text{нар}}$ — абсолютные температуры подогретого и наружного воздуха.

В дальнейшем силу P будем называть подъемной силой, а величину $A_{\text{т}}$ — коэффициентом подъемной силы.

Температура подогрева воздуха в рудничных калориферных установках $t_{\text{под}}$ может колебаться от 40 до 100°

Верхним пределом температуры наружного воздуха для работы калориферной установки можно считать $t_{\text{нар}} = 2°$, а нижним — абсолютный минимум температуры для данной местности [2].

В табл. 1 приведены значения коэффициентов подъемной силы $A_т$ для условий воздухонагрева в горном деле.

Таблица

Некоторые значения коэффициентов подъемной силы

$t_{нар}$, град	град.			
		60	80	100
+2	0,138	0,211	0,284	0,356
±0	0,146	0,220	0,293	0,366
—10	0,190	0,266	0,324	0,418
—20	0,237	0,316	0,395	0,474
—30	0,288	0,370	0,453	0,535
—40	0,343	0,429	0,515	0,601
—50	0,404	0,493	0,583	0,673

Для промежуточных значений $t_{под}$ и $t_{нар}$ коэффициент $A_т$ может быть подсчитан интерполяцией или определен по графику (рис. 2).

Как следует из табл. 1, коэффициент подъемной силы возрастает с повышением температуры подогрева воздуха и с понижением его первоначальной наружной температуры.

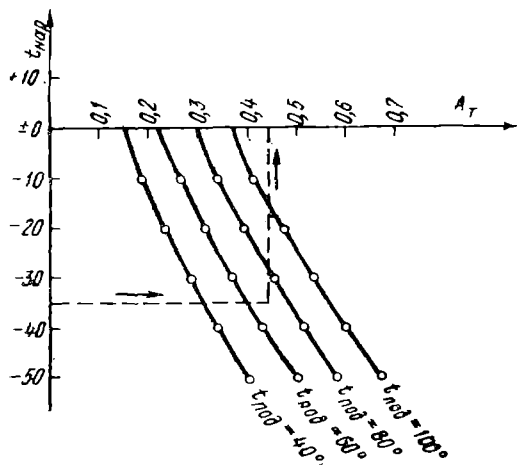


Рис. 2. График для определения коэффициента подъемной силы $A_т$. Задано: $t_{нар}=-35°$, $t_{под}=70°$, найдено $A_т=0{,}44$

Следовательно, при прочих равных условиях, подъемная сила P, определяемая формулой (2), будет тем больше, чем выше температура подогретого воздуха.

Однако величина $m_{под}$, входящая множителем в формулу (2), понижается с повышением $t_{под}$. Доказательством этого являются выражение (б) и следующее уравнение [2]:

$$G_{под}=G_{общ}\frac{t_{см}-t_{нар}}{t_{под}-t_{нар}}, \qquad (4)$$

где $G_{общ}$ — общее весовое количество воздуха, необходимого для проветривания шахты в единицу времени (например, *кг/час*);

$G_{под}$ — вес части воздуха, подогреваемого в калориферах за этот же период;

$t_{см}$ — температура смешанного в шахтном стволе воздуха, град.

Таким образом, при прочих равных условиях подъемная сила будет тем больше, чем ниже температура подогретого воздуха.

Эти взаимно-противоречивые положения заставляют найти иную, более явную, зависимость величины подъемной силы P.

Согласно уравнению (4)

$$G_{под} = \varepsilon G_{общ}, \tag{4'}$$

где

$$\varepsilon = \frac{t_{см} - t_{нар}}{t_{под} - t_{нар}} = \frac{T_{см} - T_{нар}}{T_{под} - T_{нар}} \tag{5}$$

Разделив обе части равенства (4') на величину ускорения силы тяжести g, получим

$$m_{под} = \frac{G_{под}}{g} = \varepsilon \frac{G_{общ}}{g} \tag{л}$$

Совместное решение (л), (2), (3) и (5) дает следующее значение P:

$$P = G_{общ} \varepsilon A_т = G_{общ} \frac{T_{см} - T_{нар}}{T_{нар}}.$$

Значение $G_{общ}$ в последнем уравнении при всасывающей системе вентиляции есть величина постоянная для данной шахты.

Величину $T_{см}$ в целях экономии расхода тепловой энергии стремятся поддерживать также постоянной, близкой к 275° К ($t_{см} = 2°$).

Следовательно, величина подъемной силы для данной шахты зависит исключительно от температуры наружного воздуха: подъемная сила будет тем больше, чем ниже температура наружного воздуха.

Так как температура наружного воздуха за отопительный период меняется в довольно широких пределах, то и подъемная сила P при постоянстве $t_{см}$ и $G_{общ}$ будет также непрерывно изменяться.

Как отмечалось, с целью наилучшего обогревания устья шахтного ствола окна калориферных каналов стремятся расположить по возможности ближе к поверхности земли. Поэтому при больших значениях подъемной силы P возможно непосредственное выбивание струи горячего воздуха на поверхность.

Возможно также отражение частиц горячего воздуха от встречаемой ими стенки шахтного ствола под углом, создающим импульс для движения горячего воздуха вверх, т. е. ближе к земной поверхности. Все это повлечет за собой непроизводительный расход тепловой энергии и не даст ожидаемого от калориферной установки эффекта. Наоборот, при малых значениях подъемной силы P частицы нагретого в калориферах воздуха будут слишком быстро увлекаться потоком холодного воздуха вниз. Вследствие этого струя горячего воздуха будет чрезмерно далеко от устья встречать на своем пути стенку шахтного ствола. Очевидно, при наличии такого явления значительная часть шахтного ствола подвергнется обмерзанию.

Изложенное заставляет произвести анализ физических процессов, происходящих в шахтном стволе на участке смешивания потоков подогретого и холодного воздуха.

Разложим движение на компоненты по осям координат, нанесенных на рис. 1.

Дифференциальное уравнение движения по оси $O—X$ имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = 0. \tag{а}$$

Интегрируем это уравнение дважды:

$$\frac{dx}{dt} = C_1, \qquad (б)$$

$$x = C_1 t + C_2. \qquad (в)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 определяются начальными условиями:

$x = 0$ при $t = 0$, следовательно, $C_2 = 0$;

$\frac{dx}{dt} = v_x$ при $t = 0$, следовательно, $C_1 = v_x = v_1 \cos \alpha$.

В соответствии с этим

$$x = v_1 \cos \alpha t. \qquad (г)$$

Дифференциальное уравнение движения по оси $O - Y$ может быть представлено в следующем виде:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = P = mgA_т. \qquad (д)$$

Интегрируем это уравнение два раза:

$$\frac{dy}{dt} = gA_т t + C_3, \qquad (е)$$

$$y = \frac{gA_т t^2}{2} + C_3 t + C_4. \qquad (ж)$$

Здесь произвольные постоянные определяются тоже начальными условиями:

$y = 0$ при $t = 0$, следовательно, $C_4 = 0$;

$\frac{dy}{dt} = v_y$ при $t = 0$, следовательно, $C_3 = v_y = -(v_0 + v_1 \sin \alpha)$.

Отсюда

$$y = \frac{gA_т t^2}{2} - (v_0 + v_1 \sin \alpha)\, t. \qquad (з)$$

Уравнения (г) и (з) являются параметрическими уравнениями движения, в которых t представляет время.

Совместное решение (г) и (з) дает следующее выражение:

$$y = \frac{A_т g x^2}{2 v_1^2 \cos^2 \alpha} - (v_0 + v_1 \sin \alpha) \frac{x}{v_1 \cos \alpha}. \qquad (6)$$

Это будет уравнение траектории, по которой движется частица горячего воздуха по выходе из окна калориферного канала в ствол шахты.

Выражение (6) представляет собой уравнение параболы с вершиной, расположенной ниже оси $O-X$ и сдвинутой вправо от оси $O-Y$.

Решая 24 года назад аналогичным способом задачу расчета окон калориферного канала для случая ввода воздуха в ствол одновременно через четыре окна, М. И. Слободкин и Г. В. Буханцев [1] отметили, что угол наклона окон к горизонту должен лежать в пределах 5—10°.

Практика шахтного строительства давно отошла от такого количества окон для ввода подогретого воздуха. В настоящее время обычным является устройство в шахтном стволе только одного окна.

Однако практика проектирования и строительства шахт также далеко отошла и от предела углов, указанных названными авторами. Институты Гипроруда и Гипрошахт принимают значения α в преде-

лах 25—30° При этом никаких расчетов принимаемых углов не производится и никакими нормативами значения α не ограничены.

Так или иначе, но угол α может приобретать в зависимости от вкуса проектировщика различные значения. При этом совершенно не обращается внимания на возможные последствия.

Очевидно, чтобы частицы нагретого воздуха не получали импульса для движения вверх, необходимо обеспечить встречу траектории частиц воздуха по выходе из одиночного окна калориферного канала с образующей шахтного ствола под углом $\leqslant 90°$

Если $D_{шах}$ означает диаметр шахтного ствола, то для выполнения этого условия необходимо, чтобы первая производная равенства (6) по переменной x имела при $x = D_{шах}$ значение

$$\frac{dy}{dx} \leqslant 0. \qquad (а)$$

Продифференцируем равенство (6):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{A_т g x}{v_1^2 \cos^2 \alpha} - \frac{v_0 + v_1 \sin \alpha}{v_1 \cos \alpha} \qquad (б)$$

Подставим вместо переменной x ее предельное значение $D_{шах}$ и приравняем полученную производную нулю:

$$\frac{A_т g D_{шах}}{v_1^2 \cos^2 \alpha} - \frac{v_0 + v_1 \sin \alpha}{v_1 \cos \alpha} = 0. \qquad (в)$$

Решая это равенство относительно v_1, получим следующую зависимость:

$$v_{1кр} = \frac{-v_0 \pm \sqrt{v_0^2 + 4 A_т g D_{шах} \operatorname{tg} \alpha}}{2 \sin \alpha} \ м/сек. \qquad (7)$$

Значение скорости, получаемой из последнего выражения, можно назвать критической скоростью входа в шахтный ствол воздуха, подогретого в калориферах.

Физический смысл критической скорости состоит в том, что при ней обеспечивается встреча струи подогретого воздуха с образующей шахтного ствола под прямым углом.

Для практических расчетов необходимо скорость входа в ствол струи подогретого воздуха принимать несколько больше значения положительной величины, получаемой из выражения (7).

Отрицательное значение v_1 смысла не имеет.

Для выявления возможных колебаний v_1 воспользуемся числовыми данными из примера, приведенного в сборнике задач А. И. Ксенофонтовой [3].

Пример. Шахта с суточной добычей 1250 $т$ вскрыта двумя центральноотнесенными стволами. Воздухоподающий ствол, оборудованный двухклетевым подъемом, имеет диаметр $D_{шах} = 5{,}5$ $м$. Вентиляционный ствол диаметром 4 $м$ рассчитан на одну клеть с противовесом.

По главному стволу должно поступать в подземные выработки $Q_{сек} = 42{,}5$ $м^3/сек$ воздуха.

Предположим, шахта расположена в Подмосковном бассейне. Согласно ОСТ 6232—6233 для г. Тулы $t_{нар} = -38{,}4°$ (округленно 38°) Общий секундный вес воздуха, поступающего в шахту,

$$G_{общ} = Q_{сек} \gamma_0 = 42{,}5 \quad 1{,}2 = 51 \ кг/сек.$$

Примем $t_{см} = 2°$, $t_{под} = 70°$.

Вес воздуха, подогреваемого в калориферах, из выражения (4)

$$G_{под} = 51 \frac{2 - (-38)}{70 - (-38)} = 18{,}9 \ кг/сек.$$

Вес холодного воздуха, поступающего через устье ствола,

$$G_{хол} = 51 - 18{,}9 = 32{,}1 \ кг/сек.$$

Площадь поперечного сечения воздухоподающего ствола

$$F_{шах} = \frac{\pi D^2_{шах}}{4} = \frac{3{,}14 \quad 5{,}5^2}{4} = 23{,}8 \ м^2.$$

Скорость холодного воздуха

$$v_0 = \frac{G_{хол}}{F_{шах}\gamma_{нар}} = \frac{32{,}1}{23{,}8 \quad 1{,}5} = 0{,}9 \ м/сек,$$

где $\gamma_{нар} = 1{,}5 \ кг/м^3$ — удельный вес воздуха при $t_{нар} = -38°$

Пусть угол наклона окна калориферного канала к горизонту составляет $\alpha = 15°$

Коэффициент подъемной силы при $t_{нар} = -38°$ и $t_{под} = 70°$ согласно рис. 2 будет равен $A_т = 0{,}46$.

Критическая скорость подогретого воздуха по формуле (7)

$$v_{1кр} = \frac{-0{,}9 + \sqrt{0{,}9^2 + 4 \quad 0{,}46 \quad 9{,}81 \cdot 5{,}5 \operatorname{tg} 15°}}{2 \sin 15°} = 8{,}4 \ м/сек.$$

Можно принять $v_1 = 8{,}5 \ м/сек > 8{,}4 \ м/сек$.

Дебит калориферного канала

$$Q_{кан} = \frac{G_{под}}{\gamma_{под}} = \frac{18{,}9}{1{,}029} = 18{,}4 \ м^3/сек,$$

где $\gamma_{под} = 1{,}029 \ кг/м^3$ — удельный вес подогретого воздуха при $t_{под} = 70°$

Необходимая площадь окна калориферного канала

$$F_{кан} = \frac{Q_{кан}}{v_1} = \frac{18{,}4}{8{,}5} = 2{,}17 \ м^2.$$

Подобным образом определим значение таких же величин при $\alpha = 10°$ и $\alpha = 5°$

Результаты подсчетов приводятся в табл. 2.

В последнем случае скорость входа подогретого воздуха в шахтный ствол получилась довольно высокая, но ниже предела 15 *м/сек*, предписываемого Правилами безопасности [4].

Имея необходимые значения v_1 (табл. 2), составим уравнения траекторий $y = f(x)$ для трех рассматриваемых углов α, подставляя известные величины в выражение (6).

При $\alpha = 15°$

$$y = \frac{0{,}46 \cdot 9{,}81 x^2}{2 \cdot 8{,}5^2 \cdot \cos^2 15°} - (0{,}9 + 8{,}5 \sin 15°) \frac{x}{8{,}5 \cos 15°} = 0{,}0335x^2 - 0{,}378x.$$

При $\alpha = 10°$

$$y = 0{,}0232x^2 - 0{,}268x.$$

При $\alpha = 5°$

$$y = 0{,}0143x^2 - 0{,}159x.$$

Таблица

Расчетная таблица к числовому примеру

Угол наклона калориферного канала, град.	Значение величин				
	$v_{1кр}$, *м/сек* (расчетное)	v_1, *м/сек* (принято)	$F_{кан}$,		$F_{шах}$ $F_{кан}$
	8,4	8,5	2,17	9,5	10,9
10	9,7	10,0	1,84		12,9
	12,5	12,6	1,46	14,9	16,3

На рис. 1 нанесены траектории (кривые *1*, *2* и *3*), построенные по этим уравнениям в предположении, что окно калориферного канала имеет прямоугольное сечение высотой 1,5 *м*, а расстояние от пола надшахтного здания до кровли канала будет во всех трех случаях одинаковым и равным 1,75 *м*.

При $x = D_{шах} = 5{,}5$ *м* минимальные значения y получились следующими:

для $\alpha = 15°$ $\quad y_{мин} = -1{,}07$ *м*;
$\alpha = 10°$ $\quad y_{мин} = -0{,}75$ *м*;
$\alpha = 5°$ $\quad y_{мин} = -0{,}44$ *м*;

Для обогревания шахтного ствола наиболее благоприятным будет являться третий случай, когда угол $\alpha = 5°$ Однако при этом потоку нагретого воздуха должна быть обеспечена калориферным вентилятором скорость $v_1 = 12{,}6$ *м/сек*. Естественно, по этой скорости должно определяться и динамическое давление, создаваемое вентилятором. Это значит, что к статическому напору, развиваемому вентилятором, должна прибавляться величина

$$h_{дин} = \frac{v^2}{2g}\gamma_{под} = \frac{12{,}6^2}{2 \quad 9{,}81} 1{,}029 = 8{,}3 \text{ мм вод. ст.}$$

При $\alpha = 15°$ динамическое давление составляло бы следующее значение:

$$h_{дин} = \frac{8{,}5^2}{2 \quad 9{,}81} \quad 1{,}029 = 3{,}8 \text{ мм вод. ст.}$$

Следовательно, требуемая мощность двигателя к вентилятору при $\alpha = 5°$ будет выше, чем при $\alpha = 15°$, на

$$\Delta N = \frac{(8{,}3 - 3{,}8)\ 18{,}4}{102 \quad 0{,}45} = 1{,}8 \text{ квт},$$

где 18,4 $м^3/сек$ — объем подогреваемого воздуха;
0,45 — общий к. п. д. вентиляторной установки (аэродинамический, механический и ременной передачи).

Рассмотрим влияние температуры подогрева воздуха в калориферах на значение v_1.

Примем $t_{под} = 40°$, $t_{см} = 2°$, $\alpha = 15°$.

Вес воздуха, подогреваемого в калориферах при этих условиях, будет следующий:

$$G_{\text{под}} = 51\,\frac{2-(-38)}{40-(-38)} = 26{,}2\ кг/сек.$$

Вес холодного воздуха, поступающего через устье ствола, $G_{\text{хол}} = 51 - 26{,}2 = 24{,}8\ кг/сек$.

Скорость холодного воздуха

$$v_0 = \frac{24{,}8}{23{,}8\ \ 1{,}5} = 0{,}69\ м/сек.$$

Коэффициент подъемной силы при $t_{\text{нар}} = -38°$ и $t_{\text{под}} = 40°$ согласно рис. 2 будет равен $A_{\text{т}} = 0{,}332$.

Критическая скорость подогретого воздуха

$$v_{1_{\text{кр}}} = \frac{-0{,}69 + \sqrt{0{,}69^2 + 4 \cdot 0.332\ \ 9{,}81 \cdot 5{,}5\text{tg}15°}}{2\sin 15°} = 7{,}2\ м/сек.$$

Допустим $v_1 = 7{,}5\ м/сек > 7{,}2\ м/сек$.

Дебит калориферного канала

$$Q_{\text{кан}} = \frac{C_{\text{под}}}{\gamma_{\text{под}}} = \frac{26{,}2}{1{,}127} = 23{,}5\ м^3/сек,$$

где $\gamma_{\text{под}} = 1{,}127\ кг/м^3$ — удельный вес подогретого воздуха при $t_{\text{под}} = 40°$.

Необходимая площадь окна калориферного канала

$$F_{\text{кан}} = \frac{23{,}5}{7{,}5} = 3{,}14\ м^2.$$

Значения таких же величин при $\alpha = 10°$, $\alpha = 5°$ и $t_{\text{под}} = 40°$ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетная таблица к числовому примеру

Угол и калориферного канала, град.	Значение величин				
	$v_{1\text{кр}}$, $м/сек$ (расчетное)	v_1, $м/сек$ (принято)	$F_{\text{кан}}$, $м^2$		$F_{\text{шах}} : F_{\text{кан}}$
15	7,2	7,5	3,14	10,9	7,6
10	8,4	8,5	2,76	12,3	8,6
	10,9	11,0	2,14	15,9	11,1

Сравнив табл. 2 и 3, видим, что с понижением температуры подогрева воздуха с 70° до 40° скорости воздуха получают меньшие значения, а поперечные сечения окон увеличиваются.

Имея необходимые значения v_1 (табл. 3), составим для этих условий уравнения траекторий.

При $\alpha = 15°$

$$y = \frac{0{,}332\ \ 9{,}81^2}{2\ \ 7{,}5^2\cos^2 15°} - (0{,}69 + 7{,}5\sin 15°)\frac{x}{7{,}5\cos 15°} = 0{,}031x^2 - 0{,}363x.$$

При $\alpha = 10°$

$$y = 0{,}0233x^2 - 0{,}26x.$$

При $\alpha = 5°$

$$y = 0{,}0136x^2 - 0{,}15x.$$

При $x = D_{шах} = 5{,}5$ *м* минимальные значения y:

для $\alpha = 15°$ $\quad y_{мин} = -1{,}06$ *м*,

$\alpha = 10°$ $\quad y_{мин} = -0{,}73$ *м*,

$\alpha = 5°$ $\quad y_{мин} = -0{,}42$ *м*.

Полученные значения y почти полностью совпали с y, подсчитанными ранее при $t_{под} = 70°$

Незначительные отклонения (в сотых долях метра) объясняются произвольным увеличением v_1 против подсчитанных значений $v_{1_{кр}}$ по формуле (7).

Приведенные расчеты показывают, что при прочих равных условиях ($G_{общ}$, $t_{нар}$, $t_{см}$, $D_{шах}$ и α) изменение температуры подогрева воздуха $t_{под}$ никакого влияния на форму траектории не оказывает, если скорости воздуха v_1 и v_0 связаны уравнением (7).

Кривая *4* на рис. 1 дает представление о возможной форме траектории для случая, когда v_0 увязано с $t_{под}$, но не соблюдено условие, вытекающее из уравнения (7), т. е. v_1 выбрано произвольно.

Исходные данные для построения кривой *4* те же, что и в разобранном выше примере, т. е.

$$t_{под} = 70°; \quad t_{см} = 2°; \quad t_{нар} = -38°;$$

$$A_т = 0{,}46; \quad D_{шах} = 5{,}5 \text{ } м; \quad v_0 = 0{,}9 \text{ } м/сек; \quad \alpha = 5°$$

Скорость подогретого воздуха принята равной $v = 4$ *м/сек*.

Заметим, что принятая скорость v_1 превышает v_0 почти в 4,5 раза.

Из рис. 1 видно, что в этом случае частицы подогретого воздуха из-за недостаточной величины v_1 будут выбрасываться калориферным вентилятором на поверхность.

Предположим, подогрев воздуха осуществляется двумя одинаковыми калориферными агрегатами, работающими при сильных морозах одновременно.

Каждый агрегат в этом случае оборудуется собственным вентилятором.

Очевидно для случая $t_{под} = 70°$ и других данных, приведенных в числовом примере, производительность каждого из вентиляторов должна составлять:

$$Q_{вент} = \frac{G_{под}}{2\gamma_{нар}} = \frac{18{,}9}{2 \quad 1{,}5} = 6{,}3 \text{ } м^3/сек.$$

При отрицательных наружных температурах воздуха, близких к 0°, в работе будет находиться, естественно, только один калориферный агрегат.

Вентилятор при этом будет подавать в калориферы 6,3 $м^3/сек$ воздуха, так как его производительность обычно не регулируется [5].

Допустим, температура наружного воздуха вследствие потепления повысилась до $t_{нар} = 0°$.

Вес воздуха, подогреваемого в калориферах, будет в этом случае составлять

$$G_{под} = Q_{вент}\gamma_{нар} = 6{,}3 \cdot 1{,}293 = 8{,}2 \ кг/сек,$$

где $\gamma_{нар} = 1{,}293 \ кг/м^3$ — удельный вес воздуха при $t_{нар} = 0°$

Необходимая при этом температура подогрева воздуха определится из следующего:

$$t_{под} = \frac{G_{общ}\, t_{см}}{G_{под}} = \frac{52 \quad 2}{8{,}2} = 12{,}5°$$

При $t_{под} = 12{,}5°$ и $t_{нар} = 0°$ коэффициент подъемной силы $A_т = 0{,}046$.

Скорость входа подогретого воздуха в шахтный ствол:

$$v_1 = \frac{G_{под}}{\gamma_{под} F_{кан}} = \frac{8{,}2}{1{,}236 \quad 2{,}17} = 3{,}06 \ м/сек,$$

где $\gamma_{под} = 1{,}236 \ кг/м^3$ — удельный вес воздуха при $t_{под} = 12{,}5°$;

$F_{кан} = 2{,}17 \ м^2$ — площадь окна калориферного канала (табл. 2, при $\alpha = 15°$).

Вес холодного воздуха, поступающего через устье шахтного ствола, будет равен

$$G_{хол} = G_{общ} - G_{под} = 51 - 8{,}2 = 42{,}8 \ кг/сек.$$

Скорость холодного воздуха

$$v_0 = \frac{G_{ход}}{\gamma_{нар} F_{шах}} = \frac{42{,}8}{1{,}293 \quad 23{,}8} = 1{,}39 \ м/сек.$$

Составим уравнения траекторий движения подогретого воздуха:

При $\alpha = 15°$

$$y = \frac{0{,}046 \cdot 9{,}81x^2}{2 \cdot 3{,}06^2 \cdot \cos^2 15°} - \frac{1{,}39 + 3{,}06 \sin 15° x}{3{,}06 \cos 15°} = 0{,}026x^2 - 0{,}74x.$$

При $\alpha = 10°$ (без промежуточных вычислений)

$$v_1 = 3{,}6 \ м/сек; \quad y = 0{,}018x^2 - 0{,}57x.$$

При $\alpha = 5°$

$$v_1 = 4{,}55 \ м/сек; \quad y = 0{,}011x^2 - 0{,}39x.$$

По этим трем уравнениям построены кривые *5*, *6* и *7*, приведенные на рис. 1.

Здесь нет надобности определять уравнения траекторий для таких же углов α при скоростях, отвечающих работе одного вентилятора, выбранного по начальным температурам $t_{под} = 40°$ и $t_{нар} = -38°$ Построенные по таким уравнениям кривые в точности совпадут с кривыми *5*, *6* и *7* на рис. 1.

На рис. 1 видно, что при $\alpha = 15°$ траектория движения подогретого воздуха (кривая *5*) встречается со стенкой шахтного ствола на глубине около 6 *м* от поверхности. Следовательно, устье шахтного ствола примерно на протяжении первых 5 *м* не будет обогреваться теплым воздухом.

Само собой разумеется, что при $t_{нар} < 0°$ и $\alpha = 15°$ траектории движения подогретого воздуха будут занимать положение между кривыми *1* и *5*. Подсчеты показывают, что при $t_{нар} = 2°$, $t_{см} = 2°$ и $\alpha = 15°$ траектория подогретого воздуха совпадает с кривой *6* (рис. 1).

Следовательно, при таком температурном режиме первые 4 *м* шахтного ствола будут подвержены обмерзанию.

Произведенные здесь числовые расчеты наглядно убеждают в том, что любое увеличение угла наклона окна калориферного канала вызывает, при прочих равных условиях, обязательное увеличение площади поперечного сечения окна.

Соответственное этому понижение скорости входа в шахтный ствол подогретого воздуха будет неблагоприятно сказываться на распределении его потока как по площади поперечного сечения шахтного ствола, так и в его аксиальном направлении.

При значительной ширине потока подогретого воздуха уменьшается площадь поперечного сечения шахтного ствола для входа в его устье наружного холодного воздуха. Вследствие этого в середине сечения шахтного ствола будет возрастать разрежение, способствующее выбиванию на поверхность струек, расположенных в верхней части потока подогретого воздуха.

Рассмотрение картины распределения потока подогретого воздуха в поперечном сечении ствола показывает, что при $t_{под} = 70°$, $\alpha = 5°$ $F_{кан} = 1{,}46$ $м^2$ и прочих данных, приведенных в разобранном выше примере, для прохода холодного воздуха остается менее $\frac{2}{3} F_{шах}$, а при $\alpha = 15°$ и $F_{кан} = 2{,}17$ $м^2$ — менее $\frac{1}{2} F_{шах}$.

Расчеты показывают также, что наилучшие результаты распределения потока подогретого воздуха получаются при наибольших скоростях его входа в шахтный ствол.

Наряду с этим, расчетами подтверждается, что понижение расчетной температуры подогрева не вносит никаких преимуществ ввода потока теплого воздуха в шахтный ствол.

Повышение расчетной температуры подогрева воздуха до возможного предела является желательным, так как при этом размеры окон калориферных каналов получаются наименьшими, что благоприятно сказывается на распределении потоков и их смешивании.

Изложенная теория в одинаковой мере применима и для вертикальных шахт прямоугольного сечения. В расчетных формулах (6) и (7) при этом величинам x и $D_{шах}$ должно быть придано значение стороны сечения шахтного ствола, параллельной потоку подогретого воздуха при выходе его из калориферного канала.

Наклонный шахтный ствол

При разработке пластовых месторождений представляют большой интерес условия ввода подогретого воздуха для наклонных шахтных стволов.

Актуальность постановки такого вопроса вызывается, в ущерб практике, полным отсутствием каких бы то ни было теоретических работ в этой области горной науки.

На рис. 3 представлен один из встречающихся в производстве вариантов ввода подогретого воздуха в наклонный ствол:

v_0 — скорость наружного холодного воздуха, направленного вдоль оси наклонного шахтного ствола под углом β;

v_1 — скорость подогретого в калориферах воздуха, направленного вдоль оси калориферного канала;

P — постоянная в рассматриваемый момент подъемная сила, действующая в шахтном стволе на частицу подогретого воздуха, равная разности весов холодного и подогретого воздуха и направленная противоположно силе тяжести вверх по вертикали;

$H_{шах}$ — высота поперечного сечения наклонного шахтного ствола.

Вводя прямоугольные координаты с их началом в точке O, разложим движение, как и прежде, на компоненты.

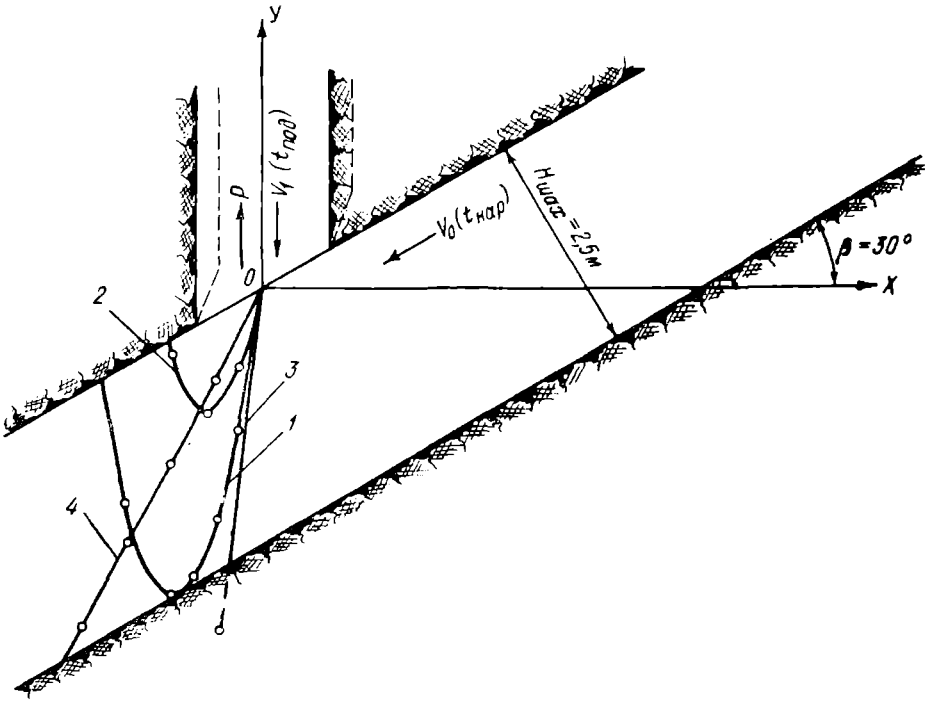


Рис. 3. Траектории движения подогретого воздуха в наклонном шахтном стволе

Дифференциальное уравнение движения по оси $O—X$ имеет следующий вид:

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=0. \qquad (а)$$

Интегрируем это уравнение дважды:

$$\frac{dx}{dt}=C_1, \qquad (б)$$

$$x=C_1t+C_2. \qquad (в)$$

Произвольные постоянные C_1 C_2 определяются начальными условиями:

$x=0$ при $t=0$, следовательно, $C_2=0$;

$\frac{dx}{dt}=v_x$ при $t=0$, следовательно,

$$C_1=v_x=-v_0\cos\beta.$$

В соответствии с этим

$$x=-v_0\cos\beta t. \qquad (г)$$

Дифференциальное уравнение движения по оси $O-Y$ примет вид:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = P = mgA_т. \qquad (д)$$

Интегрируем это уравнение также два раза:

$$\frac{dy}{dt} = gA_т t + C_3, \qquad (е)$$

$$y = \frac{gA_т t^2}{2} + C_3 t + C_4. \qquad (ж)$$

Произвольные постоянные C_3 и C_4 определяются начальными условиями:

$y = 0$ при $t = 0$, следовательно, $C_4 = 0$;

$\frac{dy}{dt} = v_y$ при $t = 0$, следовательно $C_3 = v_y = -(v_1 + v_0 \sin\beta)$.

Отсюда

$$y = \frac{gA_т t^2}{2} - (v_1 + v_0 \sin\beta)t. \qquad (з)$$

Решая совместно выражения (г) и (з) и тем самым исключая параметр t, получим

$$y = \frac{A_т g x^2}{2v_0^2 \cos^2\beta} + (v_1 + v_0 \sin\beta)\frac{x}{v_0 \cos\beta}. \qquad (8)$$

Полученное уравнение представляет собой также уравнение параболы. Вершина этой параболы расположена ниже оси $O-X$ и сдвинута влево от оси $O-Y$

В этом случае не будет опасности непосредственного выбивания частиц подогретого воздуха на поверхность как при вертикальных стволах. Однако отсутствие определенной связи между значением v_1 и другими величинами, влияющими на характер потока, может привести к такому же обледенению ствола шахты, как и при вертикальных стволах.

Из решения предыдущей задачи (вертикальный ствол) можно было видеть, что там лишь незначительная часть устья шахтного ствола не омывается деятельной струей подогретого воздуха (от 5 до 6 *м*).

При наклонных стволах картина получается иная.

Рис. 3, отвечающий случаю $\beta = 30°$ и $H_{шах} = 2{,}5$ *м* убеждает в том, что необогреваемая часть шахтного ствола будет составлять не меньше 10 *м*, считая по подошве ствола. Под подошвой ствола здесь понимается та сторона его, по которой проложены рельсовые пути для подъема полезного ископаемого.

При недостаточном значении скорости v_1 траектория движения частиц подогретого воздуха может не достигать подошвы шахтного ствола. Таким образом, возможность обмерзания ствола возрастает.

Высказанное положение будет ниже подтверждено числовым примером. Здесь же необходимо предварительно остановиться на постоянных величинах, входящих в уравнение (8).

Угол β при наклонных шахтах принимается, как известно, на основе горногеологических условий залегания пластовых месторождений и поэтому является величиной определенной, не зависящей ни в какой мере от способа подогрева воздуха.

Величина $H_{шах}$ определяется в большинстве случаев мощностью пласта, по которому осуществлена проходка ствола, реже — типораз-

мерами подъемных сосудов и другими факторами, многообразие которых рассматривается в курсах вскрытия месторождений и проходки выработок.

Следовательно, лицо, проектирующее калориферную установку, на величины $H_{шах}$ и β не может оказывать никакого влияния.

Скорость v_0 может принимать, как известно из предыдущего, различные значения в зависимости от $G_{общ}$, $F_{шах}$ и температур воздуха $t_{под}$, $t_{нар}$ и $t_{см}$.

Предельное значение $v_1 \leqslant 15$ *м/сек*.

Решение поставленной задачи сводится в данном случае к отысканию такого значения v_1, при котором траектория движения частиц подогретого воздуха, находящихся в центре потока, либо пересекала подошву наклонного ствола, либо, по крайней мере, касалась ее. Приняв за основу последнее условие, отметим, что здесь весьма затруднительно придать независимой переменной величине x, входящей в уравнение (8), какое-нибудь предельное значение. Вспомним, что для вертикального ствола предельное значение независимой переменной x приравнивалось $D_{шах}$.

Из сказанного следует, что надо найти вполне определенное значение x, при котором траектория касалась бы подошвы ствола.

Для этого напишем уравнение интересующей нас касательной:

$$y = x \operatorname{tg} \beta - \frac{H_{шах}}{\cos \beta}. \tag{9}$$

Совместное решение уравнений (8) и (9) дает следующую функциональную зависимость:

$$v_1 = -\frac{A_т g x}{2 v_0 \cos \beta} - \frac{v_0 H_{шах}}{x}, \tag{10}$$

где x — абсцисса точки пересечения траектории с подошвой ствола.

Продифференцируем последнее равенство и приравняем его нулю:

$$\frac{dv_1}{dx} = -\frac{A_т g}{2 v_0 \cos \beta} + \frac{v_0 H_{шах}}{x^2} = 0. \tag{а}$$

Отсюда

$$x_{тк}^2 = \frac{2 v_0^2 H_{шах} \cos \beta}{A_т g}. \tag{б}$$

Найденное, таким образом, значение $x_{тк}$ будет представлять абсциссу точки касания траектории с подошвой ствола.

Корни последнего уравнения

$$x_{тк} = \pm \sqrt{\frac{2 v_0^2 H_{шах} \cos \beta}{A_т g}} \tag{в}$$

Очевидно, действительным в данном случае будет знак минус перед радикалом, так как при нем, согласно уравнению (10), скорость v_1 будет иметь положительное значение.

Найдем вторую производную от равенства (10) и подставим в нее отрицательный корень выражения (в)

$$\frac{d^2 v_1}{dx^2} = -\frac{2 v_0 H_{шах}}{x^3} = \frac{-2 v_0 H_{шах}}{-\sqrt{(2 v_0^2 - H_{шах} \cos \beta) : A_т g}} > 0.$$

Следовательно, найденное значение x, согласно уравнению (в), является минимумом функциональной зависимости v_1.

Несложное преобразование этой функции позволяет представить ее в следующей окончательной форме:

$$x_{тк} = -0{,}451 v_0 \sqrt{\frac{H_{шах} \cos \beta}{A_т}} \qquad (11)$$

В этой формуле все величины являются наперед заданными.

Найдя таким образом значение $x_{тк}$, можно подставить его в выражение (10), вместо неизвестного ранее x и определить интересующую нас величину v_1.

Первая производная от функции (8):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{A_т g x}{v_0^2 \cos^2 \beta} + \frac{v_1 + v_0 \sin \beta}{v_0 \cos \beta}. \qquad (12)$$

При подстановке в формулу (12) вместо x значения $x_{тк}$, а также v_1, найденных соответственно по формулам (11) и (10), должна получиться величина, равная $\operatorname{tg} \beta$.

Пример. Пусть задано, как и в примере для вертикального ствола:

$Q_{сек} = 42{,}5$ *м³/сек*; $G_{под} = 51$ *кг/сек*;

$t_{см} = 2°$; $t_{под} = 70°$; $t_{нар} = 38°$;

$A_т = 0{,}46$; $G_{под} = 18{,}9$ *кг/сек*; $G_{хол} = 32{,}1$ *кг/сек*.

$F_{шах} = 23{,}8$ *м²*; $v_0 = 0{,}9$ *м/сек*.

Решение. Примем угол наклона к горизонту шахтного ствола $\beta = 30°$, а высоту его сечения $H_{шах} = 2{,}5$ *м*.

Определим абсциссу точки касания траектории с подошвой ствола, согласно уравнению (11)

$$x_{тк} = -0{,}451 \quad 0{,}9 \sqrt{\frac{2{,}5 \cos 30°}{0{,}46}} = -0{,}88 \text{ м}.$$

Необходимое значение скорости подогретого воздуха найдем по формуле (10)

$$v_1 = \frac{0{,}46 \quad 9{,}81 \quad 0{,}88}{2 \quad 0{,}9 \cos 30°} + \frac{0{,}9 \cdot 2{,}5}{0{,}88} = 5{,}1 \text{ м/сек}.$$

Подставим известные и полученные величины в уравнение (12)

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{0{,}46 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}88}{0{,}9^2 \cos^2 30°} + \frac{5{,}1 + 0{,}9 \sin 30°}{0{,}9 \cos 30°} = 0{,}58 = \operatorname{tg} 30°$$

Как видим, выражение (12) подтверждает правильность выведенных нами формул.

Необходимая площадь окна калориферного канала будет составлять в рассматриваемых условиях

$$F_{кан} = \frac{G_{под}}{\gamma_{под} v_1} = \frac{18{,}9}{1{,}029 \cdot 5{,}1} = 3{,}62 \text{ м}^2.$$

Траектория движения частиц подогретого воздуха для этого случая представлена кривой *1* на рис. 3.

Кривая *2* отвечает скорости воздуха $v_1 = 3$ *м/сек*, а кривая *3* — скорости $v_1 = 7$ *м/сек* при тех же величинах v_0, β и $A_т$.

Как видно на рис. 3, в случае уменьшения скорости подогретого воздуха v_1 примерно на 40% против расчетной, траектория движения резко поднимается вверх, предоставляя возможность холодному воздуху обморозить подошву ствола на значительном расстоянии от его устья.

Увеличение в таком же соотношении скорости воздуха лишь незначительно приближает траекторию движения частиц подогретого воздуха к устью ствола (рис. 3).

С этой точки зрения увеличение скорости воздуха v_1 не дает больших преимуществ. Учитывая, что ширина наклонных стволов достигает в большинстве случаев относительно большой величины, стремиться здесь к минимальным размерам поперечного сечения калориферного канала нет надобности.

Предположим, температура наружного воздуха повысилась до 0° Тогда в работе будет находиться только один калориферный агрегат.

Определим уравнение траектории для этих условий.

Согласно расчетам в примере для вертикального ствола имеем

$$G_{\text{под}} = 8{,}2 \ кг/сек; \quad t_{\text{под}} = 12{,}5°; \quad A_{\text{т}} = 0{,}046.$$

Скорость входа подогретого воздуха в шахтный ствол:

$$v_1 = \frac{G_{\text{под}}}{\gamma_{\text{под}} F_{\text{кан}}} = \frac{8{,}2}{1{,}236 \cdot 3{,}62} = 1{,}83 \ м/сек.$$

Вес холодного воздуха, поступающего через устье шахтного ствола, будет равен

$$G_{\text{хол}} = G_{\text{общ}} - G_{\text{под}} = 51 - 8{,}2 = 42{,}8 \ кг/сек.$$

Скорость холодного воздуха

$$v_0 = \frac{G_{\text{хол}}}{\gamma_{\text{шар}} F_{\text{шах}}} = \frac{42{,}8}{1{,}298 \quad 23{,}8} = 1{,}39 \ м/сек.$$

Уравнение траектории

$$y = \frac{0{,}046 \cdot 9{,}81 x^2}{2 \quad 1{,}39^2 \cos^2 30°} + (1{,}83 + 1{,}39 \sin 30°) \frac{x}{1{,}39 \cos 30°} = 0{,}155x^2 + 2{,}1x.$$

Применительно к схеме (рис. 3) можно найти несколько иное решение. Из выражений (8) и (9) находится следующее уравнение:

$$\frac{A_{\text{т}} g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \beta} + \left[\frac{v_1 + v_0 \sin \beta}{v_0 \cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \right] x + \frac{H_{\text{шах}}}{\cos \beta} = 0. \qquad \text{(а)}$$

Полученное квадратное уравнение в общем случае дает два значения x. Однако случаю касания траектории с прямой должно отвечать только одно вполне определенное значение x.

Очевидно x получит только одно значение тогда, когда в решении квадратного уравнения (а) подкоренное выражение будет равно нулю:

$$\left[\frac{v_1 + v_0 \sin \beta}{v_0 \cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \right]^2 - \frac{2 A_{\text{т}} g H_{\text{шах}}}{v_0^2 \cos^3 \beta} = 0. \qquad \text{(б)}$$

Решая последнее уравнение относительно v_1, получим

$$v_1 = 4{,}43 \sqrt{\frac{A_{\text{т}} H_{\text{шах}}}{\cos \beta}} \ м/сек. \qquad (13)$$

Легко убедиться, что последней формулой заменяются полученные ранее два выражения (10) и (11).

Подставив в выведенную здесь формулу (13) известные из разобранного выше примера величины $A_т = 0{,}46$, $H_{шах} = 2{,}5$ *м* и $\beta = 30°$, получим

$$v_1 = 4{,}43\sqrt{\frac{0{,}46 \cdot 2{,}5}{\cos 30°}} = 5{,}1 \text{ м/сек},$$

т. е. такое же значение v_1, как и по формулам (10) и (11).

Любопытно, что в рассматриваемом случае скорость подогретого воздуха v_1 не зависит от скорости холодного v_0, как это имело место при вертикальном шахтном стволе.

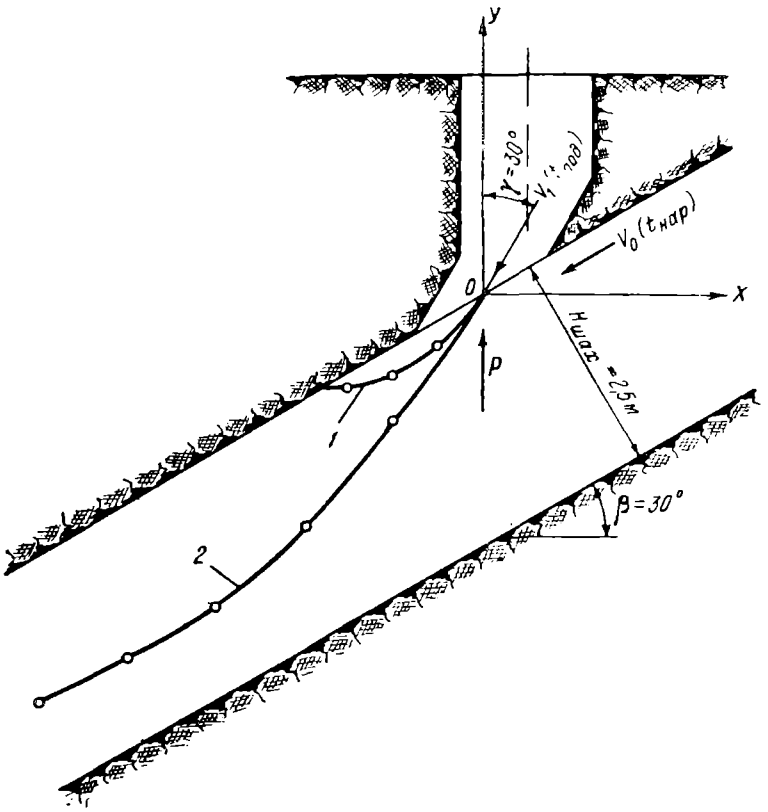


Рис. 4. Траектории движения подогретого воздуха в наклонном шахтном стволе

Кривая *4* на рис. 3 представляет собой часть ветви параболы, построенной на основе полученного выше уравнения. Она указывает, что необогреваемая часть шахтного ствола в последнем случае резко увеличивается. Однако опасность обмерзания лежащей выше части ствола при нулевой температуре наружного воздуха относительно мала. Значительно хуже будет обстоять дело, когда движение подогретого воздуха будет происходить по траектории *2* (рис. 3), отвечающей температуре наружного воздуха $t_{нар} = -38°$.

Именно этим и объясняется факт обмерзания стволов на некоторых шахтах. Незнание характера движения подогретого воздуха в подобных условиях вызвало в практике горного дела тенденцию к скашиванию выходных окон калориферных каналов в направлении, показанном на рис. 4.

Траектория движения подогретого воздуха в этом случае представится уравнением

$$y = \frac{A_T x^2}{2(v_0 \cos\beta + v_1 \sin\gamma)^2} + \frac{v_0 \sin\beta + v_1 \cos\gamma}{v_0 \cos\beta + v_1 \sin\gamma} x, \qquad (14)$$

где γ — угол между осью $O—Y$ и направлением скорости подогретого воздуха v_1 при выходе его из окна калориферного канала в наклонный шахтный ствол.

Легко видеть, что при $\gamma = 0°$ последнее выражение превращается в уравнение (8), что подтверждает его правильность.

Если $\gamma = 30°$, $\beta = 30°$, $t_{под} = 70°$, $t_{нар} = -38°$, $v_0 = 0{,}9$ *м/сек* и $v_1 = 3$ *м/сек*, то, согласно уравнению (14) траектория движения подо-

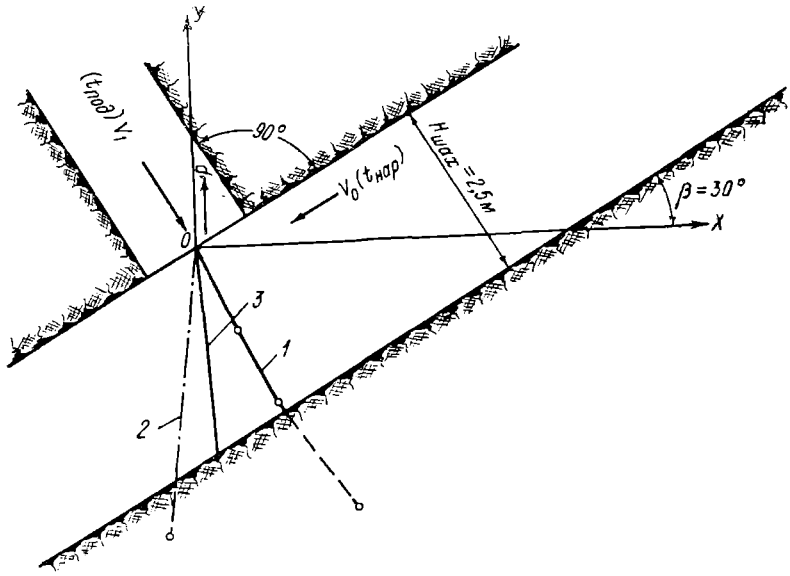


Рис. 5. Траектории движения подогретого воздуха в наклонном шахтном стволе

гретого воздуха представится кривой *1*, а при $v_1 = 7$ *м/сек* — кривой *2* (рис. 4).

Сравнив рис. 3 и 4, видим, что во втором случае возможность обмерзания шахтного ствола значительно возрастает, а поэтому последняя схема сопряжения окна калориферного канала со стволом не должна применяться в горной промышленности. Более того, сопоставление рис. 3 и 4 приводит к мысли о создании скоса окна калориферного канала в направлении, противоположном представленному на рис. 4. Наиболее естественно и просто осуществить сопряжение калориферного канала с кровлей наклонного ствола под углом, равным 90°

Такая схема ввода подогретого воздуха в наклонный шахтный ствол приведена на рис. 5. Обозначения те же, что и на предыдущих схемах.

Опуская промежуточные выкладки, напишем применительно к этому случаю уравнение траектории движения частиц подогретого воздуха, находящихся в центре потока:

$$y = \frac{A_T g x^2}{2(v_1 \sin\beta - v_0 \cos\beta)^2} - \frac{v_1 \cos\beta + v_0 \sin\beta}{v_1 \sin\beta - v_0 \cos\beta} x. \qquad (15)$$

Эта траектория движения получилась также в форме параболы, вершина которой расположена, как и при вертикальном стволе, ниже оси $O—X$ и справа от оси $O—Y$

Удовлетворительным значением скорости подогретого воздуха v_1 будет здесь такая ее величина, при которой траектория движения, выраженная уравнением (15), пересечет подошву наклонного ствола под углом, равным 90°

Это значит, что касательная к траектории в точке встречи ее с подошвой ствола должна быть взаимно перпендикулярна с линией, расположенной в плоскости подошвы ствола.

Уравнение наклонной линии в плоскости подошвы ствола представится, как уже отмечалось ранее, в следующем виде:

$$y = x \operatorname{tg} \beta - \frac{H_{\text{шах}}}{\cos \beta}.$$

Совместным решением уравнений (9) и (15) находим в общем виде точку пересечения траектории с подошвой ствола:

$$x = \frac{\dfrac{v_1 \cos \beta + v_0 \sin \beta}{v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta} + \operatorname{tg} \beta}{\dfrac{gA_T}{(v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta)^2}} - \frac{\sqrt{\left(\dfrac{v_1 \cos \beta + v_0 \sin \beta}{v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta} + \operatorname{tg} \beta\right)^2 - \dfrac{2A_T g H_{\text{шах}}}{(v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta)^2 \cos \beta}}}{\dfrac{gA_T}{(v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta)^2}} \tag{16}$$

Очевидно, первая производная функции (15) должна при этом значении x получиться равной обратной величине углового коэффициента в выражении (9), с обратным знаком, т. е.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{A_T g x}{(v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta)^2} - \frac{v_1 \cos \beta + v_0 \sin \beta}{v_1 \sin \beta - v_0 \cos \beta} = -\frac{1}{\operatorname{tg} \beta}. \tag{17}$$

Заменяя в последнем равенстве величину x ее значением из формулы (16), получим

$$v_1 = \frac{2A_T g H_{\text{шах}} \operatorname{tg}^2 \beta + 2v_0^2 \sin^2 \beta \cos \beta + v_0^2 \cos \beta + v_0^2 \sin^3 \beta \operatorname{tg} \beta}{4v_0 \sin^3 \beta + 2v_0 \sin \beta \cos^2 \beta + 2v_0 \sin^3 \beta \operatorname{tg}^2 \beta}. \tag{18}$$

Все величины в первой части формулы (18) являются заранее известными, поэтому по ней может быть подсчитано необходимое значение скорости v_1.

Для практического пользования формула (18) имеет громоздкий вид и требует некоторого упрощения.

С этой целью выясним изменение числовых коэффициентов при постоянных величинах, входящих в последнюю формулу, в зависимости от угла наклона ствола β.

Нетрудно получить следующие три зависимости:

при $\beta = 30°$ $\quad v_1 = \dfrac{6{,}54A_T H_{\text{шах}} + 1{,}16v_0^2}{1{,}33v_0}$; (а)

$\beta = 45°$ $\quad v_1 = \dfrac{19{,}62A_T H_{\text{шах}} + 1{,}41v_0^2}{2{,}83v_0}$; (б)

„ $\beta = 60°\ldots$ $\quad v_1 = \dfrac{58{,}86A_T H_{\text{шах}} + 2{,}0v_0^2}{6{,}93v_0}$. (в)

На основе полученных выражений формулу (18) для облегчения расчетов можно представить в следующем виде:

$$v_1 = \frac{\alpha A_т H_{шах} + \delta v_0^2}{\lambda v_0} \qquad (19)$$

Коэффициенты α, δ и λ, являющиеся функцией угла наклона ствола β, могут быть найдены по кривым, приведенным на рис. 6.

Проследим на числовом примере влияние угла наклона β на значение v_1 при прочих равных условиях.

Пример. Пусть задано:

$$v_0 = 0{,}9 \ м/сек; \quad H_{шах} = 2{,}5 \ м; \quad A_т = 0{,}46.$$

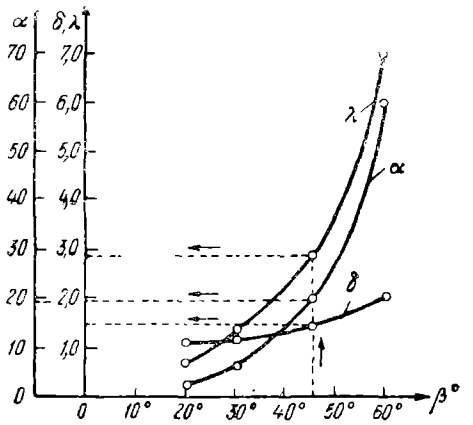


Рис. 6. График для определения коэффициентов к формуле (19). Задано $\beta = 45°$. Найдено: $\alpha = 19{,}62$, $\delta = 1{,}41$, $\lambda = 2{,}83$

Спрашивается, какие значения должна получить скорость подогретого воздуха v_1 при углах наклона β 30°, 45° и 60°

Решение.

Согласно формулам (а), (б) и (в) получим:

при $\beta = 30°$

$$v_1 = \frac{6{,}54 \cdot 0{,}46 \cdot 2{,}5 + 1{,}16 \cdot 0{,}9^2}{1{,}33 \cdot 0{,}9} = 7 \ м/сек;$$

при $\beta = 45°$

$$v_1 = \frac{19{,}62 \cdot 0{,}46 \cdot 2{,}5 + 1{,}41 \quad 0{,}9^2}{2{,}83 \cdot 0{,}9} = 9{,}3 \ м/сек;$$

при $\beta = 60°$

$$v_1 = \frac{58{,}86 \cdot 0{,}46 \cdot 2{,}5 + 2 \cdot 0{,}9^2}{6{,}93 \cdot 0{,}9} = 11{,}1 \ м/сек.$$

На рис. 5 кривая *1* построена для шахтного ствола с углом наклона $\beta = 30°$ при $v_1 = 7$ *м/сек* и значениях других величин, приведенных в последнем примере.

Кривая *2* (рис. 5) представляет траекторию движения частиц подогретого воздуха при таких же скоростях и температурах воздуха, но при условии сопряжения калориферного канала со стволом таким образом, как это изображено на рис. 3, т. е. при $\gamma = 60°$.

Сравнив траектории *2* и *1* на рис. 5, видим, что схема сопряжения калориферного канала, представленная на рис. 5, имеет преимущества по сравнению со схемой рис. 3, так как при одинаковых скоростях v_1 и v_0 и температурах $t_{под}$, $t_{нар}$ и $t_{см}$ воздуха необогреваемая часть ствола значительно сокращается. Применительно к рассматриваемому здесь примеру это сокращение составляет около 2 *м*. При увеличении угла наклона шахтного ствола β необогреваемая его часть будет сокращаться в большей степени.

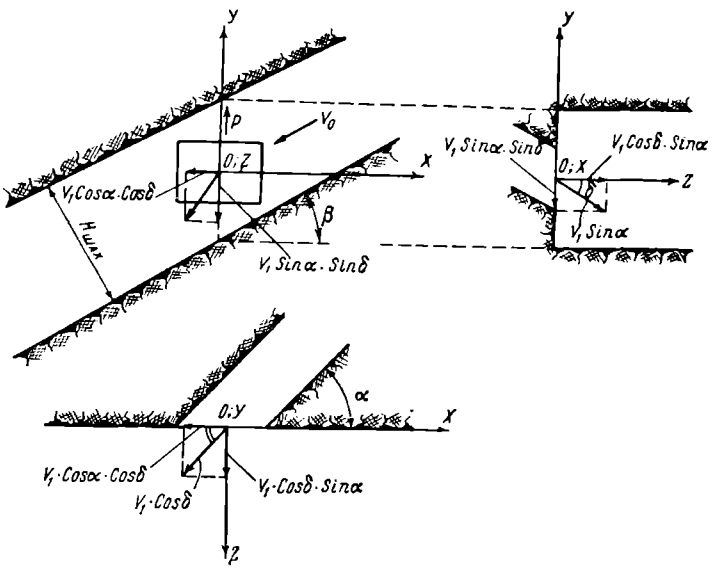


Рис. 7. Проекции скорости движения подогретого воздуха при боковом сопряжении калориферного канала с наклонным шахтным стволом

Кривая *3* на рис. 5 относится к случаю подогрева воздуха одним калориферным агрегатом при $t_{нар} = 0°$ и $t_{под} = 12{,}5°$

Рассмотренными выше схемами не исчерпывается практика ввода подогретого воздуха в наклонные шахтные стволы.

На рис. 7 приведена схема для шахт с наклонными стволами, применяемая Гипрошахтом. В общем случае подогретый воздух подводится под углом α к боковым стенкам шахтного ствола и под углом δ к горизонту. Сама шахта имеет угол наклона к горизонту, равный β.

Рассматривая, как и ранее, движение элементарной частицы, находящейся в центре потока подогретого воздуха и вводя прямоугольные координаты $O—X$, $O—Y$ и $O—Z$, напишем для этого случая дифференциальные уравнения движения:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = 0; \qquad \text{(а)}$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = P = mgA_т; \qquad \text{(б)}$$

$$m\frac{d^2z}{dt^2} = 0. \qquad \text{(в)}$$

Интегрируя каждое из этих уравнений по два раза, получим:

$$\frac{dx}{dt} = C_1; \qquad (г)$$

$$x = C_1 t + C_2; \qquad (д)$$

$$\frac{dy}{dt} = gA_\tau t + C_3; \qquad (е)$$

$$y = \frac{A_\tau g t^2}{2} + C_3 t + C_4; \qquad (ж)$$

$$\frac{dz}{dt} = C_5; \qquad (з)$$

$$z = C_5 t + C_6. \qquad (и)$$

Произвольные постоянные определяются начальными условиями:

$$x = 0; \quad y = 0; \quad z = 0 \quad \text{при} \quad t = 0;$$

$$\frac{dx}{dt} = v_x; \quad \frac{dy}{dt} = v_y; \quad \frac{dz}{dt} = v_z \quad \text{при} \quad t = 0.$$

В соответствии с этим:

$$C_2 = 0; \quad C_4 = 0; \quad C_6 = 0;$$

$$C_1 = v_x = -(v \cos\alpha \cos\delta + v_0 \cos\beta); \qquad (к)$$

$$C_3 = v_y = -(v_1 \sin\alpha \sin\delta + v_0 \sin\beta); \qquad (л)$$

$$C_5 = v_z = v_1 \sin\alpha \cos\delta. \qquad (м)$$

Правильность написания v_x, v_y, v_z легко проследить по рис. 7.

Подставляя эти значения произвольных постоянных в уравнения (д), (ж), (и), получим:

$$x = -(v_1 \cos\alpha \cos\delta + v_0 \cos\beta)\, t; \qquad (н)$$

$$y = \frac{A_\tau g t^2}{2} - (v_1 \sin\alpha \sin\delta + v_0 \sin\beta)\, t; \qquad (о)$$

$$z = v_1 \sin\alpha \cos\delta t. \qquad (п)$$

Исключая из трех последних уравнений параметр t, получим проекции траекторий на соответствующих плоскостях проекций:

на плоскости XOY

$$y = \frac{A_\tau g x^2}{2(v_1 \cos\alpha \cos\delta + v_0 \cos\beta)^2} + \frac{v_1 \sin\alpha \sin\delta + v_0 \sin\beta}{v_1 \cos\alpha \cos\delta + v_0 \cos\beta} x; \qquad (20)$$

на плоскости YOZ

$$y = \frac{A_\tau g z^2}{2(v_1 \sin\alpha \cos\delta)^2} - \frac{v_1 \sin\alpha \sin\delta + v_0 \sin\beta}{v_1 \sin\alpha \cos\delta} z; \qquad (21)$$

на плоскости XOZ

$$x = -\frac{(v_1 \cos\alpha \cos\delta + v_0 \cos\beta)}{v_1 \sin\alpha \cos\delta} z. \qquad (22)$$

Проекции траекторий, выражаемые уравнениями (20) и (21), представляют параболы с вершинами, расположенными ниже осей OX и OZ. Выражение (22) представляет уравнение прямой.

Очевидно, в рассматриваемом случае удовлетворительным будет такое значение скорости подогретого воздуха v_1, при котором траектория движения его частиц будет либо пересекать, либо касаться подошвы наклонного ствола.

Уравнение плоскости подошвы ствола, согласно рис. 7, представится в следующем виде:

$$y = x \operatorname{tg} \beta - \frac{H_{шах}}{2 \cos \beta} \tag{23}$$

Заметим, что эта плоскость перпендикулярна к вертикальной плоскости проекций XOY

Если траектория касается в пространстве плоскости, заданной уравнением (23), то ее след на вертикальной плоскости проекции будет являться касательной к соответствующей проекции траектории.

Из этого следует, что абсцисса точки касания X будет найдена из совместного решения уравнений (20) и (23)

$$\frac{A_т g x^2}{2 (v_1 \cos \alpha \cos \delta + v_0 \cos \beta)^2} + \left(\frac{v_1 \sin \alpha \sin \delta + v_0 \sin \beta}{v_1 \cos \alpha \cos \delta + v_0 \cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \right) x + \frac{H_{шах}}{2 \cos \beta} = 0. \tag{р}$$

Естественно, точке касания будет отвечать одно значение x, которое получится только в том случае, когда подкоренное выражение в решении квадратного уравнения (р) будет равно нулю

$$\left(\frac{v_1 \sin \alpha \sin \beta + v_0 \sin \beta}{v_1 \cos \alpha \cos \delta + v_0 \cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \right)^2 - \frac{A_т g H_{шах}}{(v_1 \cos \alpha \cos \delta + v_0 \cos \beta)^2} = 0. \tag{с}$$

Отсюда находится выражение для определения скорости воздуха на выходе из канала v_1:

$$v_1 = \frac{\pm 3{,}13}{\sin \alpha \sin \delta - \cos \alpha \cos \delta \operatorname{tg} \beta} \sqrt{\frac{A_т H_{шах}}{\cos \beta}}. \tag{24}$$

Знак перед постоянным множителем должен приниматься таким, чтобы значение v_1 получалось всегда положительным.

Из формулы (24) видно, что значение скорости v_1 достигает бесконечно большой величины при $\alpha = 0°$ и $\delta = 0°$, поэтому углы α и δ должны быть отличными от нуля.

Угол α обычно принимается в пределах 45—90°

Выявим влияние углов α и δ на значения v_1 при прочих равных условиях.

Пусть принято: $A_т = 0{,}5$; $H_{шах} = 2{,}5$ *м*; $\beta = 15°$

1. Допустим, $\alpha = 45°$ и $\delta = 45°$

Подставляя все известные величины в формулу (24), получим

$$v_1 = \frac{3{,}13}{\sin 45° \sin 45° - \cos 45° \cos 45° \operatorname{tg} 15°} \sqrt{\frac{0{,}5 \quad 0{,}5}{\cos 15°}} = 9{,}7 \ м/сек.$$

2. Пусть $\alpha = 90°$, а остальные величины останутся прежними.

В этом случае

$$v_1 = \frac{3{,}13}{\sin 45°} \sqrt{\frac{0{,}5 \cdot 2{,}5}{\cos 15°}} = 5{,}0 \ м/сек.$$

Из этого следует, что с увеличением угла α значение v_1 уменьшается.

3. Примем $\alpha = 90°$; $\delta = 21°30'$; значения остальных величин те же.

$$v_1 = \frac{3{,}13}{\sin 21°30'} \sqrt{\frac{0{,}5 \quad 2{,}5}{\cos 15°}} = 9{,}7 \ м/сек.$$

Таким образом, с уменьшением угла δ значение скорости подогретого воздуха v_1 возрастает.

Полученные значения v_1 можно подставить в уравнения (20), (22) и по ним построить соответственные проекции траекторий для каждой из трех плоскостей проекций, найдя предварительно величину скорости холодного воздуха v_0 по формуле (1),

Поступило 6. 1 1952 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слободкин М. И. и Буханцев Г В., Метод расчета калориферного отопления и распределительных каналов для шахтного ствола, Горный журнал 1927, № 10.

2. Северин Л. П., Об исходных данных для расчета рудничных калориферных установок, Записки Ленинградского горного института 1952, т. XXVI, вып. I.

3. Ксенофонтова А. И., Сборник задач по рудничной вентиляции, Углетехиздат, 1948, стр. 160—172.

4. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах, Углетехиздат, 1951.

5. Комаров В. Б. и Борисов Д. Ф., Рудничная вентиляция, ГОНТИ, 1938, стр. 412.