

УДК 622.45

СТРУКТУРА ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛАХ

П. И. Мустель

В начале текущего столетия П. Вильский, ориентируя в Прибриаме шахту глубиной 1090 м, обнаружил, что замеры примычных углов при движении воздуха по шахтному стволу и при отсутствии этого движения дают расхождение $11'31''$. На основании этого и по данным визуальных наблюдений над движением воздуха в стволах он выдвинул гипотезу о винтовом движении воздуха по стволу, влияющем на величину отклонения отвеса a . Величину отклонения a он определил по формуле

$$a = \frac{\bar{p}H^2}{2G},$$

где $\bar{p}$ — боковое давление воздуха на проволоку отвеса, $\kappa\Gamma/\text{м}$; H — глубина шахты, м; G — вес действующего груза, $\kappa\Gamma$.

Однако, во-первых, при винтовом движении с учетом существующих скоростей ожидаемое отклонение отвеса значительно больше наблюдаемых на практике. Во-вторых, и это основное, шахтные работники, имеющие возможность ежедневно наблюдать характер движения воздуха в стволах, не обнаруживают винтового движения в явном виде, что также ставит под сомнение достоверность гипотезы.

Наблюдениями зафиксированы при отвесном проектировании в одних случаях ненормально большие отклонения, в других — небольшие. Это привело к необходимости специальных наблюдений за поведением отвесов в стволах.

Наиболее тщательно исследована А. К. Сентемовым [1941] модель вертикального шахтного неармированного ствола диаметром 0,5 м и длиной 22 м. Внизу ствол кончался моделью околоствольного двора, где был смонтирован вентилятор, работавший как на всасывающем, так и на нагнетательном режиме. В результате наблюдений А. К. Сентемов пришел к выводу, что воздух движется по стволу винтообразно, вращение происходит по часовой стрелке для наблюдателя, обращенного по направлению поступательного движения струи. Однако опыты О. Н. Гордейко в модели шахтного ствола не обнаружили вращательного движения и, таким образом, не подтвердили выводов А. К. Сентемова.

По данным И. Г. Лисицы [1963], при повороте воздуха из околоствольного двора в ствол образуется парный вихрь, который затем переходит в винтовое движение. Но такого движения не обнаружил Н. А. Крякунов [1965], наблюдая за отвесами в шахте Артем-II-Глубокая.

Существование разных точек зрения на этот важный для маркшейдерских работ вопрос и обусловило наши опыты на модели шахтного ствола. Опытная установка (рис. 1) представляет собой модель вертикального круглого гладкого шахтного ствола в масштабе 1 : 100, высотой 2800 мм, диаметром 41,5 мм. В верхней части модели имеется канал вентилятора

прямоугольного сечения, в нижней — околоствольный двор. Реверсивный вентилятор присоединялся к каналу вентилятора и околоствольному двору.

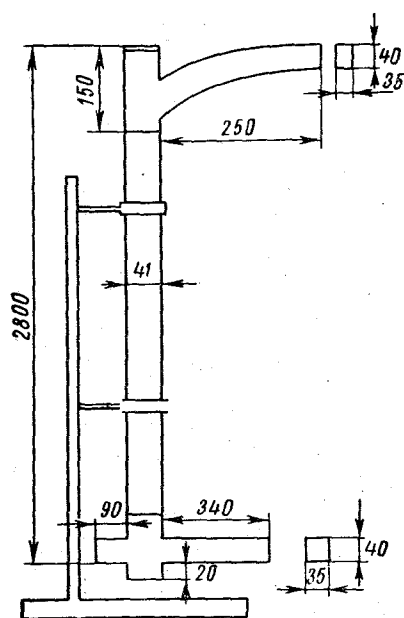


Рис. 1. Общий вид модели шахтного ствола.

Скорость движения воздуха при проведении опытов изменялась от 3,85 до 6,55 м/сек, число Рейнольдса, соответственно, от 10 000 до 18 000, что гарантировало устойчивую турбулентность потока. Визуальные наблюдения обнаружили винтовое движение при помощи детекторов, состоящих из легких алюминиевых и слюдяных пластинок-мотылей, свободно вращающихся на вертикальной оси (рис. 2, а). При отсутствии винтового движения мотыль оставался неподвижным, а при возникновении «винта» начал вращаться в ту или иную сторону в зависимости от направления вращения потока. Парные вихри (а также винтовое движение) обнаруживались детекторами. Один из них состоял из пяти мотылей, расположенных близ стенок ствола (рис. 2, б), другой — из двух большего размера (рис. 2, в).

Исследования проводились при восходящем и нисходящем движении воздуха по стволу, всасывающем и нагнетательном способах проветривания, при установке вентилятора в устье ствола и

в околоствольном дворе, в гладком и армированном стволах. Установлено, что в гладких стволах, лишенных армировки, при нагнетательном

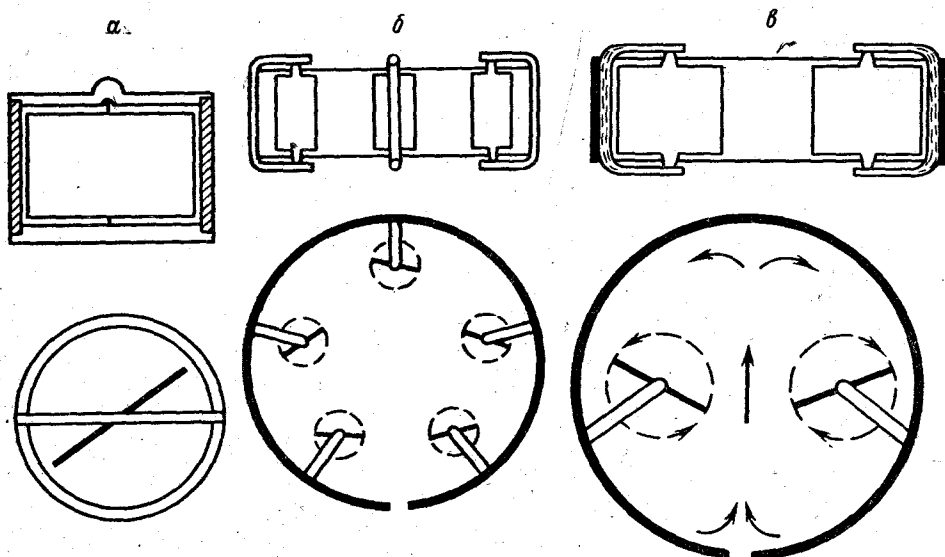


Рис. 2. Детекторы для обнаружения движений: а — винтового; б, в — винтового и парных вихрей соответственно с пятью и двумя мотылями.

проветривании вентилятором, установленным на поверхности, ниже канала вентилятора образуется интенсивное винтовое движение. Оно направлено против часовой стрелки (во всех случаях наблюдатель смотрит по струе) и распространяется на глубину до $40d$ (d — диаметр ствола).

При перемене режима работы вентилятора на всасывающий винтовое движение начинается сразу за поворотом струи из околоствольного двора в ствол, вращение происходит по часовой стрелке и распространяется на $20d$ по стволу. При нагнетательном проветривании вентилятором, установленным на околоствольном дворе (струя по стволу восходящая), интенсивное винтовое движение, направленное по часовой стрелке, наблюдается в стволе выше околоствольного двора на расстоянии, превышающем $40d$. При перемене режима работы вентилятора на всасывающий (струя по стволу нисходящая) и полностью открытом устье ствола винтовое движение наблюдается примерно в $10d$ от поверхности (в этом опыте канал вентилятора был снят, а на конце трубы монтировалась горизонтальная площадка, имитирующая поверхность), направление вращения струи переменное — часть времени мотыль вращается по часовой стрелке, затем на мгновение останавливается и начинает вращаться в обратную сторону.

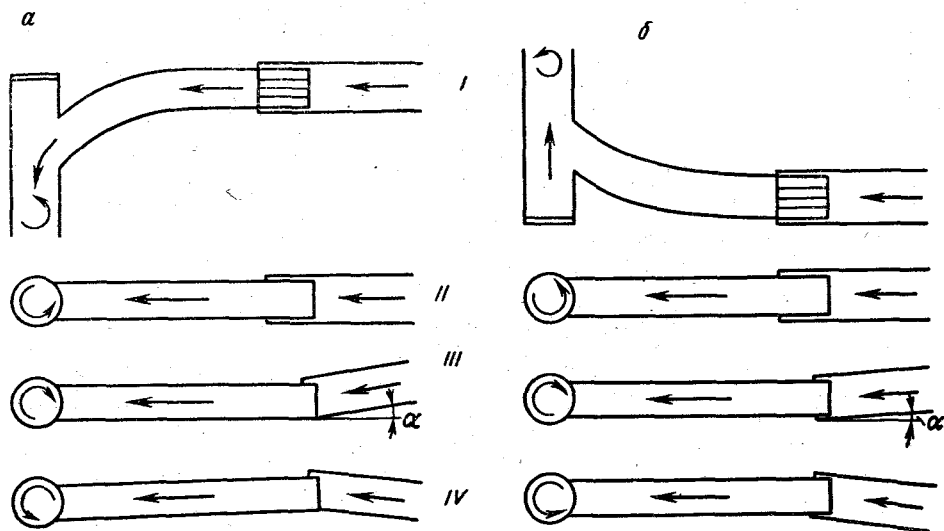


Рис. 3. Определение влияния на направление вращения «винта» искривления выработки при проветривании: а — нисходящем; б — восходящем.

Повторение опыта при установке на поверхности модели надшахтного здания с отверстием для прохода каната и открытой двери показало интенсивное винтовое движение воздуха на глубину $15-20d$ с вращением по часовой стрелке.

Направление вращения потока детально изучалось в условиях, когда выработка, подводящая к стволу воздух, в одних случаях была строго прямолинейной (в ней устанавливалась спрямляющая решетка для устранения попадания в ствол случайных вихрей, возникших в выработке), а в других — ось выработки умышленно искривлялась. При установке нагнетательного вентилятора на поверхности и спрямляющей решетке (рис. 3, а, I) возникало вращение против часовой стрелки. Оно сохранялось и после снятия решетки (рис. 3, а, II). При соединении подводящей воздушной магистрали с каналом под некоторым углом α (III) вращение происходило по часовой стрелке, а при изменении направления изгиба (IV) вновь меняло направление.

При установке нагнетательного вентилятора в нижней части вертикальной трубы для сохранения полной идентичности условий опыта основание вертикальной трубы соединялось с тем же каналом вентилятора, повернутым на 180° (рис. 3, б, I). При установке спрямляющей решетки и без нее, но с сохранением прямолинейности потока (рис. 3, б, II), вращение происходило по часовой стрелке. При искривлении подводящей воздух

выработки (рис. 3, б III) направление вращения менялось, а при проведении опыта по схеме IV вращение вновь шло по часовой стрелке.

Интересны результаты исследования о влиянии на направление вращения воздуха в стволе изменения условий входа воздушного потока в ствол за счет постепенного, несимметрично расположенного относительно ствола сужения (рис. 4, I, II), вагонеток, стоящих у ствола (III, IV), и шахтных подъемных сосудов (V, VI). Как видно из рисунка, направление вращения, которое в данном случае без искусственного возмущения потока происходит по часовой стрелке, можно изменить на обратное в зависимости от местоположения предметов, создающих добавочное возмущение.

Изучение условий возникновения парных вихрей представляет несомненный интерес. Они образуются в гладких стволах вслед за поворотами

воздушной струи и оказывают влияние на точность отвесного ориентирования шахт. Возникновение парного вихря в плавно изогнутых коленях

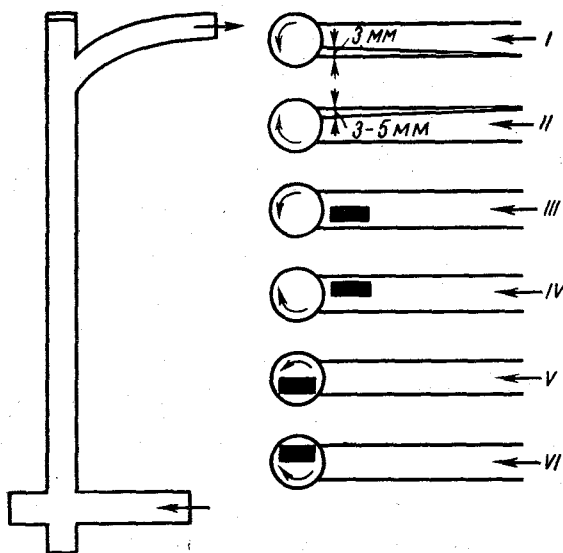


Рис. 4. Определение влияния на структуру потока внешних возбудителей.

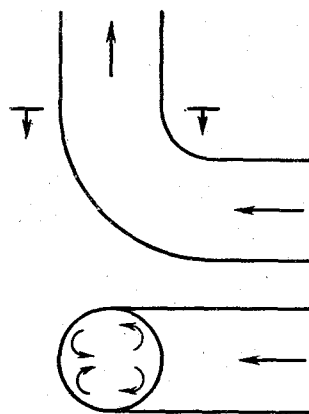


Рис. 5. Структура парного вихря, возникающего за плавным поворотом.

известно давно (рис. 5). Однако образование парных вихрей на поворотах при поступлении воздуха из вентиляционного канала или выработки околоствольного двора в ствол требует экспериментального подтверждения. Для опытов были использованы детекторы. Детектор с пятью мотылями (рис. 6) устанавливали в стволе на расстоянии l от кровли околоствольной выработки, равном d (I), $2,5d$ (II) и $3d$ (III). Как видно на рис. 6, а, I, структура потока не соответствует ни парному вихрю, ни винтовому движению. Так, мотыль 1, установленный прямо против входа потока в ствол, периодически вращается то в одну, то в другую сторону. Мотыль 2 вращается так, как он должен вращаться при возникновении парного вихря, а мотыль 3 — так, как он должен вращаться при винтовом движении, направленном по часовой стрелке. Установка детектора на расстоянии $2,5d$ (рис. 6, а, II) также не дает полной картины парного вихря, так как мотыли 1 и 2 при этом совершенно не вращаются, а мотыль 3 чаще вращается по направлению стрелки, как при парном вихре, а иногда — в обратную сторону. Остальные мотыли вращаются, как при парном вихре.

При расположении детектора на расстоянии $3d$ (рис. 6, а, III) следов парного вихря уже не обнаруживается, винтовое же движение наблюдается не отчетливо, не по всему периметру. Таким образом, при сопряжении круглого гладкого ствола с выработкой околоствольного двора парный вихрь

не образуется, возникает винтовое движение с вращением по часовой стрелке, а отдельные элементы парного вихря проявляются не отчетливо.

Анализ характера потока, изображенного на рис. 6, а, показывает, что в неармированном шахтном стволе на разных расстояниях от кровли

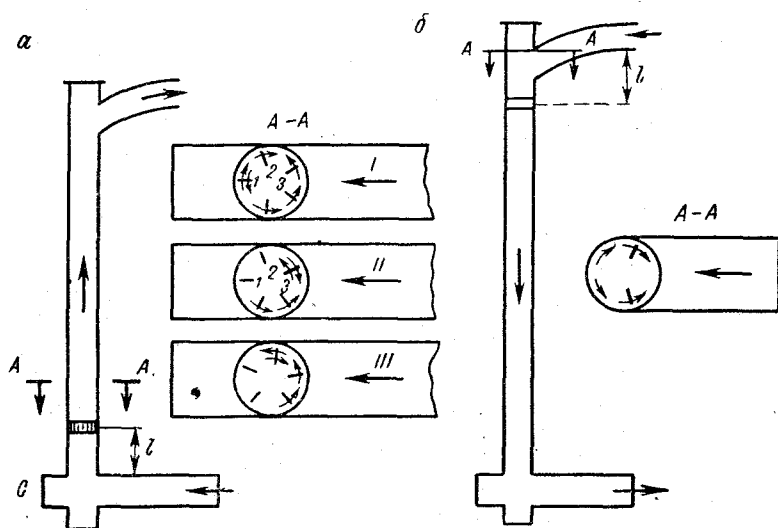


Рис. 6. Возникновение парного вихря при: а — восходящем движении воздуха; б — выходе воздуха в ствол из канала вентилятора.

околоствольной выработки направление вихрей неодинаково. Если можно рассчитывать, что в сечении II оба отвеса под действием вихрей будут смещаться в одну сторону и примерно на одну и ту же величину, то уже в сечении III это не так очевидно, а в сечении IV, отстоящем от сечения II всего на $2d$, линия отвеса будет стремиться к повороту. Следовательно, ни гипотеза винтового движения, ни гипотеза парного вихря

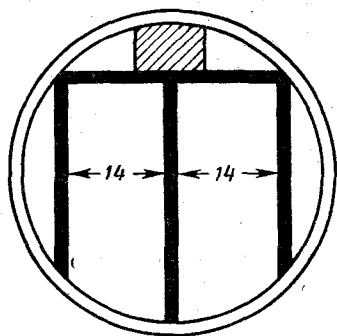


Рис. 7. Армирование ствола.

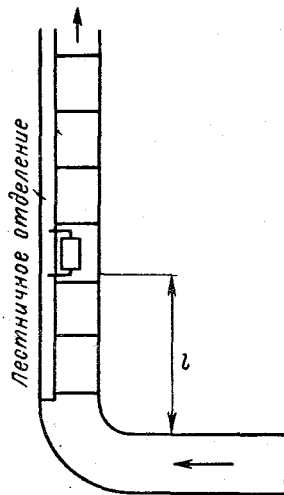


Рис. 8. Схема опыта в армированном стволе при восходящем движении воздуха по стволу.

в чистом виде для объяснения величины и направления отклонения отвесов даже в гладких неармированных стволах непригодны.

На рис. 6, б изображена схема парных вихрей, возникающих в стволе ниже канала вентилятора при нагнетательном проветривании. Детектор, состоящий из двух мотылей, установлен в стволе ниже почвы канала вентилятора на расстояниях 3; 4,2; 5,5; 7,5; 9,75 и $12,5d$. Во всех случаях мотыли

детектора вращались так, как показано на рис. 6, б, подтверждая возникновение парного вихря. Лишь на расстоянии $12,5d$, на котором был окончен опыт, они начали вращаться в одну сторону, свидетельствуя о переходе парного вихря в винтовое движение по часовой стрелке.

Проведенные опыты позволяют с достаточной степенью надежности судить об условиях возникновения винтового движения и парных вихрей в неармированных шахтных стволах. Полученные результаты, естественно, не распространяются на армированные стволы, где характер движения воздуха совсем иной. Для этих условий была изготовлена армировка для ствола, рассчитанного на два скипа и имеющего лестничное отделение (рис. 7). Для обнаружения вращательного движения струи воздуха между третьим и четвертым комплектом армировки (снизу, от околоствольной выработки) в каждом отделении вмонтировано по одному мотылю. Опыты проводились при восходящем движении воздуха по стволу. Воздух подводился к основанию ствола по выработке круглого сечения с плавным сопряжением (рис. 8).

В неармированном стволе при работе по этой схеме, как показали опыты, создается устойчивый парный вихрь. При наличии же армировки мотыли, установленные в каждом отделении, не вращались даже кратковременно и лишь слегка колебались под влиянием возникающих завихрений струи.

При подаче воздуха к стволу по модели выработки прямоугольного сечения в неармированном стволе устанавливалось, как указано выше, недостаточно четкое винтовое движение, и местами возникал парный вихрь. В армированном стволе и в этом случае мотыли, установленные в каждом отделении ствола, не вращались. Более того, при создании на горизонте околоствольного двора искусственных возмущений, что в неармированных стволах приводило к интенсивному винтовому движению, в отделениях ствола также не возникало винтового движения. Таким образом, в армированных стволах, вследствие раздробляющего действия расстрелов на воздушный поток, винтовое движение воздуха и парный вихрь не возникают.

Выводы

1. Винтовое движение в неармированных воздухоподающих стволах возникает в следующих случаях.

1. Если их устье выходит непосредственно на дневную поверхность и не имеет надшахтного здания. Глубина распространения «винта» не превышает $10d$, направление вращения переменное.

2. Если устье закрыто надшахтным зданием. При поступлении воздуха через открытые двери здания и отверстие для прохода каната возникает интенсивное и устойчивое винтовое движение с вращением по часовой стрелке. Возбудителем этого движения является надшахтное здание, интенсивность вихреобразования зависит от взаимного расположения устья ствола и тех отверстий, через которые воздух поступает в надшахтное здание.

3. Если воздух поступает в ствол из вентиляционного канала, возникает интенсивное винтовое движение, распространяющееся на глубину до $40d$.

Такое движение возникает при эксцентричном примыкании канала к стволу и во всех случаях, когда вентиляционная струя под влиянием внешних причин (например, искривления канала в горизонтальной плоскости) смещается от центра ствола, вследствие чего ось потока не совпадает с осью ствола. Направление вращения «винта» может быть по и против часовой стрелки и зависит от того, в какую сторону от оси ствола отклоняется ось выходящего из канала потока.

4. Если воздух выдается на поверхность за счет работы нагнетательного вентилятора, установленного на другом стволе, или за счет работы всасывающего вентилятора, установленного близ устья данного ствола. Выше околоствольного двора образуется интенсивное винтовое движение с вра-

щением по часовой стрелке. Оно распространяется на высоту ствола примерно на $20d$.

Направление вращения «винта» может измениться, если, как и в предыдущем случае, ось струи в околоствольной выработке сдвинута от центра ствола, и во всех случаях, когда находящиеся в околоствольном дворе составы и вагонетки, а также опущенный на данный горизонт подъемный сосуд или какие-либо другие внешние возбудители смещают ось воздушного потока в околоствольной выработке по отношению к оси шахты.

II. Парный вихрь в неармированных стволах возникает в следующих случаях.

1. При плавном примыкании к стволу канала вентилятора, по которому воздух нагнетается в шахту. В этом случае при полном совпадении оси потока в канале с осью ствола парный вихрь симметричен и сохраняется в стволе на протяжении примерно $12d$. Затем движение воздуха переходит в винтовое. Чем больше отклоняется ось потока, идущего по каналу от центра ствола, тем на меньшем протяжении ствола сохраняется парный вихрь вследствие его несимметричности, и тем раньше он переходит в винтовое движение. Наконец, при некотором значении отклонения парный вихрь не образуется, а сразу возникает винтовое движение.

2. При входе воздуха в ствол из выработки околоствольного двора парный вихрь отличается асимметрией и быстро переходит в винтовое движение. Смещение оси потока, движущегося в околоствольной выработке от оси ствола за счет искривления подводящей выработки, влияния составов или подъемных сосудов и других причин, приводит к полному уничтожению парного вихря и в стволе сразу же возникает винтовое движение.

III. Парные вихри и винтовое движение в армированных шахтных стволах ни при каких условиях, в том числе и искусственном искривлении оси потока в выработках, подводящих к стволу воздух, не возникают.

IV. Несмотря на то, что в настоящее время распространены главным образом стволы, снабженные армировкой, раздробляющей воздушный поток и препятствующей возникновению парных вихрей и винтового движения, в недалеком будущем при переходе на разработку с больших глубин могут найти применение новые виды армировки. Тогда живое сечение не будет занято проводниками и расстрелами, структура потока станет подобной структуре, наблюдавшейся в неармированных стволах. Маркшейдеры при проектировании отвесами вновь встретятся с влиянием на отвесы парных вихрей и винтового движения.

ЛИТЕРАТУРА

- Крякунов Н. А. Поведение шахтного отвеса. Тр. ВНИМИ, сб. XXX, 1956.
Лисица И. Г. Основные вопросы проектирования отвесами при геометрическом ориентировании шахт. Автореф. докт. дисс., ЛГИ, 1963.
Сентемов А. К. Отклонение отвеса под влиянием воздушной струи. Тр. ЦНИМБ, вып. 13, 1941.
-