

ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ КЛЕТЕЙ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Н. А. Хохлов, К. З. Ушаков

Известно, что движение сосудов (клетей и скипов) в стволах шахт увеличивает сопротивление. По наблюдениям А. М. Карпова, сопротивление увеличивается до 10% при средней интенсивности работы и до 25% — при интенсивной работе, когда повышенная турбулизация потока сохраняется и во время коротких пауз [1]. В узких стволах сопротивление может повыситься до 50%.

В момент встречи клетей в стволе сопротивление еще больше увеличивается, а количество поступающего в шахту воздуха уменьшается в течение некоторого промежутка времени.

При подъеме с нескольких горизонтов сопротивление стволов увеличится также вследствие наличия в них полков на уровне горизонтов, играющих роль вентиляционных окон. В этом случае в зависимости от положения клетей и места их встречи в стволе возможно некоторое перераспределение воздуха по горизонтам, т. е. будут наблюдаться пульсации воздуха, связанные с подъемом. Величина их будет зависеть не только от сопротивления сосудов, но и от аэродинамического сопротивления горизонтов.

В литературе почти нет данных о влиянии движения подъемных сосудов в стволах на сопротивление последних. Р. А. Бретон установил, что при отношении $\frac{l}{F} = \lambda$ в пределах 1,4—2 (l — длина сосуда, м; F — поперечное сечение сосуда, м²) коэффициент лобового сопротивления α равен 5,2—5,5 [2]. Однако опыты проведены на модели при неподвижных клетях и совершенно недостаточной длине рабочего участка модели, превышающей длину двухэтажной клетки примерно в 6 раз, а длину трехэтажной — в 3,9 раза. Это ставит полученные результаты под сомнение.

Цель настоящей работы — исследование влияния интенсивности работы подъема (продолжительности и скорости движения подъемных сосудов) на сопротивление ствола. Кроме того, исследовано аэродинамическое сопротивление движущихся клетей и определено увеличение сопротивления ствола при наличии в нем подъемных сосудов*.

Экспериментальная установка — модель ствола типа Н-126-67Т-2 в масштабе 1 : 17,45 (рис. 1). По длине отштита лестничного отделения установлены перемычки. Коэффициент аэродинамического сопротивления $\alpha = 19,3 \cdot 10^{-3} \text{ н} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^{***}$. Схема установки представлена на рис. 2.

* Экспериментальная часть настоящей работы выполнена в лаборатории рудничной вентиляции горного факультета Королевского колледжа науки и технологии в Глазго под руководством проф. Г. Хиберда и старшего лектора А. Стюарта, за что авторы приносят им искреннюю благодарность.

** Единицы измерения даны в системе СИ.

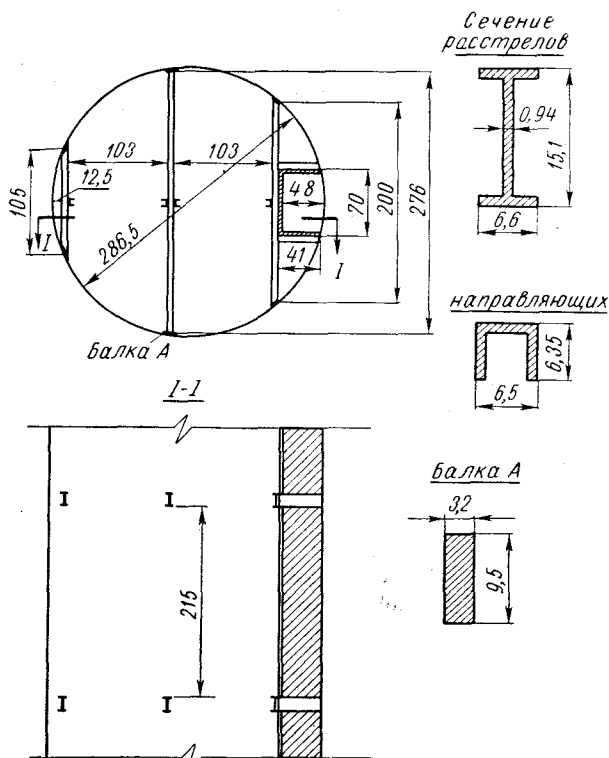


Рис. 1. Схема армировки модели.

Сечение модели $0,0646 \text{ м}^2$, сечение лестничного отделения $0,0031 \text{ м}^2$, периметр модели с учетом лестничного отделения $0,985 \text{ м}$, суммарная длина расстрелов в сечении $0,663 \text{ м}$, суммарная площадь расстрелов в плане $0,0044 \text{ м}^2$, сечение модели без лестничного отделения $0,0615 \text{ м}^2$.

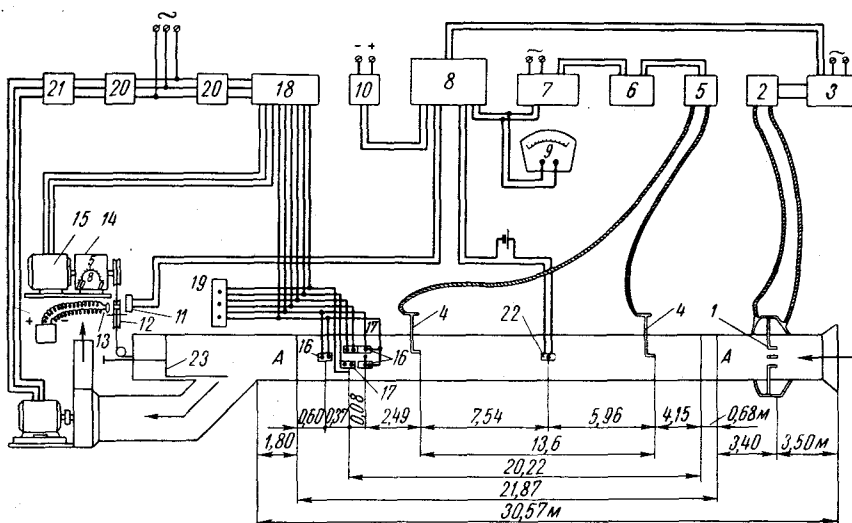


Рис. 2. Блок-схема измерительной аппаратуры модели.

1 — устройство для измерения скоростного напора воздуха, поступающего в модель; 2 — датчик с мостом для измерения скоростного напора; 3 — усилитель; 4 — трубки Пито в начале и конце рабочего участка; 5 — датчик для измерения потерь давления на рабочем участке; 6 — электрический мост; 7 — усилитель; 8 — шлейфовый осциллограф; 9 — контрольный гальванометр; 10 — электрические часы; 11 — фотоэлемент; 12 — шкив с отверстием; 13 — источник света; 14 — редуктор для регулирования скорости движения клеток; 15 — электродвигатель; 16 — стоп-контакты; 17 — контакты реверсирования направления движения клеток; 18 — реле управления движением клеток; 19 — дистанционная переносная панель управления движением клеток; 20 — рубильники; 21 — пускатель; 22 — контакт сигнала в месте встречи клеток; 23 — шибер для регулирования количества воздуха в модели; АА — участок трубы с армировкой.

В модели перемещаются макеты двух клеток — одноэтажных или двухэтажных (рис. 3) с длиной пробега 20,22 м. Управление движением клеток автоматическое или ручное с помощью дистанционной переносной панели 19. Скорость движения клеток регулируется редуктором 14 от 0,3 до 1,6 м/сек.

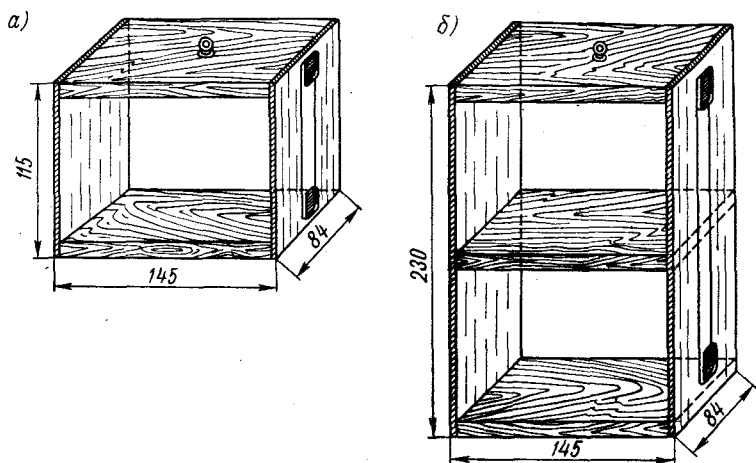


Рис. 3. Схема устройства клеток: а — одноэтажной; б — двухэтажной. Миделево сечение клеток 0,0122 м².

В момент встречи движущихся клеток включается электрический контакт 22, сигнал о встрече поступает в шлейфовый осциллограф 8, где производится соответствующая отметка на фотопленке (рис. 4).

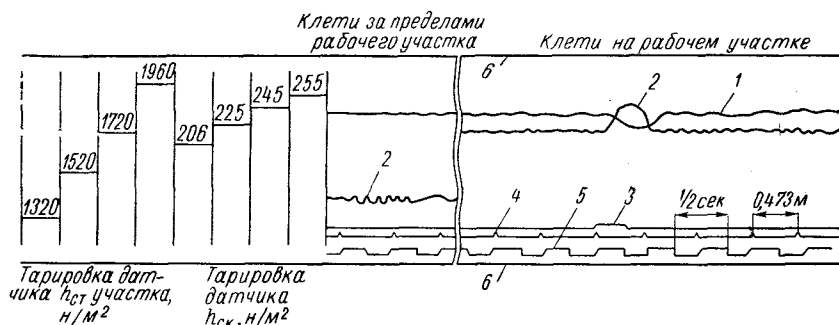


Рис. 4. Схема записи результатов экспериментов на пленке.

1 — скоростной напор; 2 — потери давления на рабочем участке; 3 — место встречи клеток; 4 — обороты шкива; 5 — время; 6 — край пленки.

Скорость движения клеток определяют по пленке, на которую нанесены отметки времени и числа оборотов приводного шкива 12.

Скорость воздуха в модели изменялась от 13 до 21 м/сек. Для ее определения измеряли средний скоростной напор потока с помощью присоединенных к одному шлангу четырех динамических трубок и четырех статических отверстий. Трубки установлены по двум взаимно перпендикулярным диаметрам трубы на расстоянии от ее стенки $\frac{1}{2,65}$ радиуса трубы (определенном нашим опытом). Замеряемое скоростное давление передается

электрическому датчику 2, сигналы которого через усилитель 3 после 25—30-кратного усиления поступают в осциллограф и записываются на пленку (см. рис. 4).

Для определения статической депрессии на концах рабочего участка (длиной 13,5 м) установлены статические трубки, присоединенные плангами к датчику диафрагменного типа (рис. 5), который является плечом электрического моста 6 (рис. 2). При изменении давления воздуха латунная диафрагма датчика прогибается и ток дебаланса моста поступает на усилитель 7, а затем в осциллограф 8 и для контроля — на микрогальванометр 9 (см. рис. 2). Все сигналы в осциллографе записываются на пленку, которая перемещается с различной заданной скоростью.

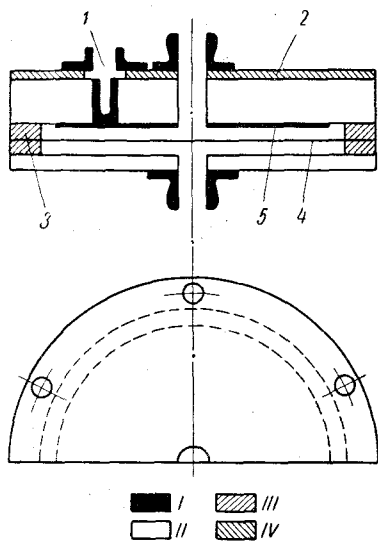


Рис. 5. Схема устройства датчика давления емкостного типа.

I — латунь; II — пластмасса; III — сталь; IV — алюминий; 1 — гнездо щетки; 2 — токопроводящая стенка датчика; 3 — стальное кольцо; 4 — диафрагма; 5 — неподвижная пластинка диаметром около 100 мм.

Перед производством замеров устанавливается режим работы вентилятора, определяются пределы измерения давления на рабочем участке и скоростного напора при определенном режиме работы. Точки (лучи) осциллографа устанавливаются в начальное положение, выбираются величины усиления из условия максимального перемещения луча осциллографа по ширине пленки.

Затем с помощью микроманометра Betz тарируют датчики 2 и 5 (рис. 2) и записывают на пленку изменение давления на рабочем участке $h_{ст}$ и скоростного напора $h_{ск}$ при двух-трех циклах движения клетей. Для контроля датчики тарируют повторно. Пример записи результатов на пленке приведен на рис. 4.

Процесс движения клетей в стволах шахт носит комбинированный характер. Он определяется, с одной стороны, аэродинамическими параметрами потока воздуха и модели, а с другой — параметрами движения клетей.

При остановленных клетях движение воздуха в модели является установившимся. Для соблюдения подобия в этом случае достаточно выдерживать равенство критерия Re для модели и натуре. Однако движение клетей превращает аэродинамический процесс в модели в периодический, т. е. неустановившийся.

Как известно, уравнение неустановившегося движения воздуха дает четыре критерия подобия — Фруда Fr , Эйлера Eu , Рейнольдса Re и критерий гомохронности Ho . Критерий Fr представляет собой отношение сил тяжести и сил инерции потока. При движении воздуха с небольшим удельным весом силами тяжести можно пренебречь и, таким образом, число Fr теряет значение критерия подобия.

Известно также, что при движении несжимаемой жидкости, на которое не влияют силы тяжести, всегда имеет место автомодельность процессов в натуре и модели относительно числа Эйлера. Принимая с некоторым приближением движущийся в стволе воздух за несжимаемую жидкость, из числа параметров, определяющих аэродинамическое подобие процесса, можно исключить и критерий Эйлера. Следовательно, применительно к рассматриваемому случаю имеем два критерия подобия — число Рейнольдса и критерий гомохронности.

Приняв в качестве единицы измерения длины L диаметр модели и единицы измерения времени — время T между двумя последовательно из-

менными направлениями движения клетки (полупериод ее движения), критерий гомохронности можно записать в виде

$$Ho = \frac{vT}{L},$$

где v — скорость движения воздуха.

Как указано выше, скорость движения клеток в модели изменялась от 0,3 до 1,6 м/сек, скорость движения воздуха — от 13 до 21 м/сек. Длина пробега клетки примерно 20 м, диаметр модели $D = 0,287$ м.

Определим соответствующие натурные условия. Число Re для принятых в модели условий находится в пределах 260 000—410 000. Как известно (например [3]), автомоделный режим в стволах наступает при числах Re около 200 000. Таким образом, эксперименты на модели проводились в области автомоделных режимов, что позволяет переносить их результаты на натурные условия со значительно более высокими числами Рейнольдса, т. е. на высокие скорости движения воздуха (при $Re = 260\,000$ скорость воздуха в стволе диаметром 6 м равна 0,625 м/сек).

Для принятых в эксперименте условий полупериод движения клетки T изменялся от 63 сек при скорости движения клетки 0,3 м/сек до 12,5 сек при скорости 1,6 м/сек. Учитывая, что скорость воздуха в модели изменялась от 13 до 21 м/сек, получим диапазон изменения числа Ho от 570 до 4600. Принимая для натуре скорость воздуха в стволе 8 м/сек и диаметр ствола 6 м, получим полупериод движения клеток в натуре $T \geq 7$ мин. Иными словами, по критерию гомохронности условия эксперимента приближаются к работе подъема в глубоких стволах.

Влияние продолжительности работы подъема на сопротивление ствола. Выяснение влияния продолжительности движения клеток на сопротивление ствола имеет значение не только для определения величины аэродинамического сопротивления [1], но и для правильного выбора методики экспериментов. При наличии такого влияния замеры следовало выполнять по истечении определенного времени с момента начала движения клеток, достаточного для достижения максимальной турбулизации потока и, следовательно, установления постоянного сопротивления ствола.

Для изучения влияния продолжительности работы подъема на сопротивление стволов были поставлены специальные эксперименты. Непрерывно записывали среднюю по сечению скорость движения воздуха в модели и депрессию рабочего участка, начиная с момента начала движения клеток. За время наблюдения каждая клетка проходила по модели 4—6 раз. Скорость движения клетки: 0,324; 0,626; 1,086; 1,582 м/сек. Скорость воздуха в модели около 20 м/сек ($Re = 400\,000$).

Результаты наблюдений показывают, что аэродинамическое сопротивление рабочего участка остается практически постоянным как при каждой данной скорости клетки, так и в пределах всего эксперимента. Это имеет важное значение, так как эксперимент продолжался почти непрерывно, с небольшими паузами для изменения скорости клетки. Так, при первом полупериоде движения клеток сопротивление рабочего участка составляло $981 \text{ н} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^8$ (100 кг), а при восемнадцатом (считая с начала эксперимента) — $1050 \text{ н} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^8$ (107 кг). Отклонение от среднего $\pm 3,5\%$. В пределах пятого — восемнадцатого циклов сопротивление остается практически постоянным.

Таким образом, можно считать, что при достаточно высоких числах Рейнольдса аэродинамическое сопротивление шахтных стволов не зависит от интенсивности работы подъема.

Сопротивление движущихся клеток. Потери давления, затрачиваемые на преодоление сопротивления клетки, можно представить в виде

$$h_{кл} = h_{л.с} + h_{расш}, \quad (1)$$

где $h_{л.с}$ — потери давления на преодоление лобового сопротивления клетки;

$h_{расш}$ — потери давления на расширение воздушной струи при выходе воздуха из сечения с клетью в сечение без нее.

Давление движущегося воздуха на тело, расположенное поперек потока, — лобовое давление

$$p_{лоб} = c h_{ск} S_{мид} = 9,81 c v_1^2 S_{мид} \frac{\gamma}{2g} \text{ н}, \quad (2)$$

где c — коэффициент лобового сопротивления;

$h_{ск}$ — скоростной напор в сечении потока, где расположено тело, н/м^2 ;

$S_{мид}$ — миделево сечение тела, м^2 ;

v_1 — скорость движения воздуха в сечении, где находится обтекаемое тело, м/сек ;

γ — удельный вес воздуха, н/м^3 .

Далее имеем

$$v_1 (S - S_{мид}) = v S, \quad (3)$$

где v — средняя скорость движения воздуха в стволе, м/сек ;

S — площадь поперечного сечения ствола в свету, м^2 .

Обозначив отношение $\frac{S_{мид}}{S}$ через ψ , получим

$$v_1 = \frac{v S}{S - S_{мид}} = \frac{v}{1 - \psi}. \quad (4)$$

Мощность, затрачиваемая на обтекание тела в стволе при скорости движения воздуха v_1 ,

$$W = p_{лоб} v_1 = 9,81 c v^3 \frac{\gamma}{2g} S_{мид} \text{ вт}. \quad (5)$$

Подставляя значение v_1 из (4) в формулу (5), получим

$$W = 9,81 c \frac{v^3}{(1 - \psi)^3} S_{мид} \frac{\gamma}{2g} \text{ вт}. \quad (6)$$

Разделив выражение (6) на количество протекающего в стволе воздуха Q , получим падение давления $h_{л.с}$, расходуемого на преодоление лобового сопротивления клетки,

$$h_{л.с} = \frac{W}{Q} 9,81 c \frac{v^3 \psi}{(1 - \psi)^3} \frac{\gamma}{2g} = 0,6 c \frac{v^3 \psi}{(1 - \psi)^3} \text{ н/м}^2. \quad (7)$$

Отсюда

$$c = 1,67 \frac{h_{л.с} (1 - \psi)^2}{v^3 \psi}. \quad (8)$$

При обтекании клетки воздушным потоком имеет место срыв струй и внезапное расширение потока после прохождения им крыши, межэтажного перекрытия и пола клетки. Потери давления, вызванные внезапным расширением воздушной струи при срыве ее с пола клетки, определяем по формуле

$$h_{расш} = 9,81 (v_1 - v)^2 \frac{\gamma}{2g} \text{ н/м}^2. \quad (9)$$

Заменив в выражении (9) значение v_1 по выражению (4), получим

$$h_{расш} = 9,81 \frac{\psi^2 v^2}{(1 - \psi)^2} \frac{\gamma}{2g} = 0,6 \frac{\psi^2 v^2}{(1 - \psi)^2} \text{ н/м}^2. \quad (10)$$

Потери давления, вызываемые расширением потока после прохождения им крыши и межэтажного перекрытия, подсчитываем аналогично таковым при срыве потока с пола. Для одноэтажной клетки

$$h_{\text{расш}}^I = 0,6 \frac{\psi_1^2 v^2}{(1-\psi_1)^2} \text{ н/м}^2. \quad (11)$$

Для двухэтажной клетки при одинаковой высоте этажей

$$h_{\text{расш}}^{II} = 2h_{\text{расш}}^I = 1,2 \frac{\psi_1^2 v^2}{(1-\psi_1)^2} \text{ н/м}^2. \quad (12)$$

Здесь ψ_1 определяется аналогично ψ , но по $S'_{\text{мид}}$ межэтажного перекрытия или пола клетки (расчет $S'_{\text{мид}}$ см. ниже).

Полная потеря давления от расширения потока при одноэтажных и двухэтажных клетях

$$h_{\text{расш.полн}}^I = 0,6 \frac{\psi^2 v^2}{(1-\psi)^2} + 0,6 \frac{\psi_1^2 v^2}{(1-\psi_1)^2} \text{ н/м}^2, \quad (13)$$

$$h_{\text{расш.полн}}^{II} = 0,6 \frac{\psi^2 v^2}{(1-\psi)^2} + 1,2 \frac{\psi_1^2 v^2}{(1-\psi_1)^2} \text{ н/м}^2. \quad (14)$$

Заменяем в выражении (1) значения $h_{\text{л.с}}$ и $h_{\text{расш}}$ значениями из (7) и (13) или (14), и, разделив правую и левую части на Q^2 , получим сопротивление клеток одноэтажной

$$R_{\text{кл}}^I = \frac{h_{\text{кл}}^I}{Q^2} = 0,6 \frac{1}{S^2} \left[c \frac{\psi}{(1-\psi)^3} + \frac{\psi^2}{(1-\psi)^2} + \frac{\psi_1^2}{(1-\psi_1)^2} \right] \text{ н} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^8 \quad (15)$$

и двухэтажной

$$R_{\text{кл}}^{II} = \frac{h_{\text{кл}}^{II}}{Q^2} = 0,6 \frac{1}{S^2} \left[c \frac{\psi}{(1-\psi)^3} + \frac{\psi^2}{(1-\psi)^2} + 2 \frac{\psi_1^2}{(1-\psi_1)^2} \right] \text{ н} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^8. \quad (16)$$

Коэффициент лобового сопротивления c , вообще говоря, зависит от числа Re , формы тела и характера его поверхности. Как показывают опыты, по достижении достаточно большого значения числа Re коэффициент c становится практически постоянным и не зависит от скорости движения воздуха [1]. Для плохо обтекаемых тел (прямоугольные брусья, двутавры и т. п.) величина c фактически не зависит от числа Re и степени турбулизации потока [3]. Форму клетки можно характеризовать коэффициентом λ .

Для условий опыта при рассредоточенном положении клеток в стволе имеем для каждой клетки: $S_{\text{мид}} = 0,0122 \text{ м}^2$, $S_{\text{ств}} = 0,0615 \text{ м}^2$, $\psi = 0,1985$.

При частичном расширении струи после прохождения крыши или межэтажного перекрытия площадь части межэтажного перекрытия или пола клетки $S'_{\text{мид}}$ при угле расширения струи $\alpha = 0,21$ радиана (12°) определяется выражением

$$S'_{\text{мид}} = 2Hb \operatorname{tg} \alpha = 2 \cdot 0,4 \cdot 0,145 \operatorname{tg} 12^\circ = 0,0061 \text{ м}^2,$$

где H — высота этажа клетки, $м$;

b — ширина клетки (вдоль необшитой ее стороны), $м$.

В этом случае $\psi_1 = 0,0992$.

Для обеих клеток при их встрече $\psi = 0,397$, $\psi_1 = 0,1984$.

Результаты определения коэффициентов лобового сопротивления c представлены на рис. 6. Среднее значение их для двухэтажных клеток при $\lambda = 2,1$ равно 1,32, а для одноэтажных при $\lambda = 1,05$ равно 1,18,

или меньше на 12%, что объясняется меньшим аэродинамическим сопротивлением одноэтажных клеток по сравнению с двухэтажными.

При скорости движения клетки в модели до 1,6 м/сек коэффициент лобового сопротивления клетки практически не меняется. В момент встречи клеток сопротивление их, а следовательно, и ствола, увеличивается. В этот момент по стволу проходит меньше воздуха. Для сравнения потерь давления на преодоление сопротивления клеток при их встрече с сопротивлением клеток при их значительном удалении друг от друга необхо-

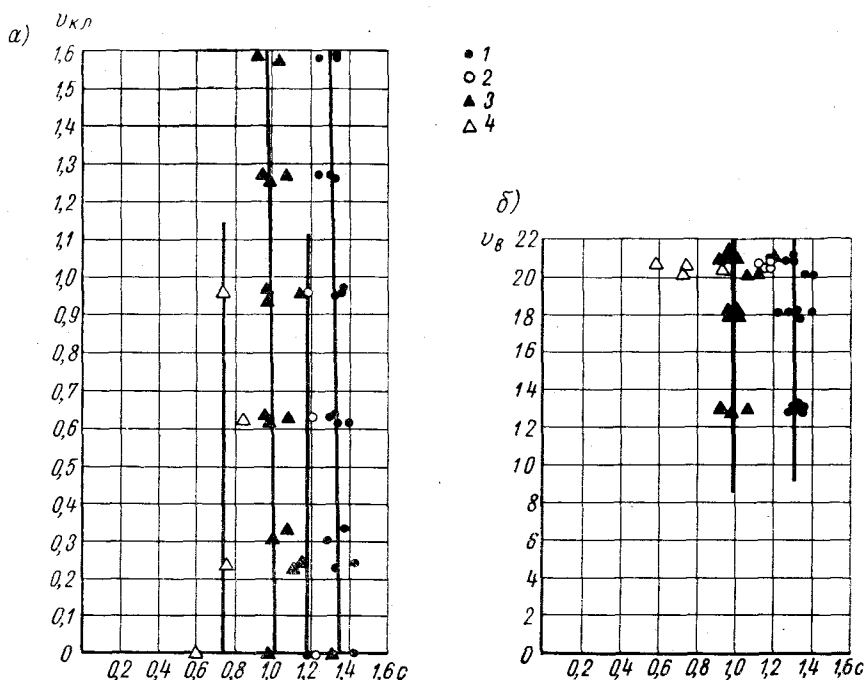


Рис. 6. Зависимость коэффициента лобового сопротивления с одно- и двухэтажных клеток от скорости в модели: а — клетки $v_{кл}$; б — воздуха v_8 . 1 и 2 — двух- и одноэтажные клетки; 3 и 4 — двух- и одноэтажные клетки при встрече.

димо потери давления $h_{ст.уч}$ в момент встречи клеток умножить на $\frac{v^2}{v_1^2}$, т. е. привести все данные замеров к одному и тому же количеству воздуха

$$h'_{ст.уч} = h_{ст.уч} \frac{v^2}{v_1^2},$$

где $h'_{ст.уч}$ — депрессия на участке в момент встречи клеток, приведенная к количеству воздуха, соответствующему рассредоточенному расположению клеток;

$h_{ст.уч}$ — замеренная депрессия на участке в момент встречи клеток;
 v_1 — скорость движения воздуха в модели, соответствующая рассредоточенному расположению клеток;

v — то же, в момент встречи клеток.

Как видно из рис. 7, где построены кривые увеличения депрессии при встрече двухэтажных клеток $h_{встр.}$, потери давления, затрачиваемые на преодоление сопротивления при встрече клеток, увеличиваются примерно в два раза по сравнению с потерями давления при рассредоточенном расположении клеток $h_{норм.}$. Это увеличение потерь давления происходит примерно в течение времени, за которое клетки пройдут расстояние около двух диаметров модели, или 2,5 l клетки.

Некоторое смещение кривых вправо относительно точки встречи можно объяснить инерцией измерительной аппаратуры, так как при движении взаимное влияние клеток наблюдалось в течение короткого промежутка времени (например, при скорости клетки 1,6 м/сек время взаимного влияния 0,1 сек).

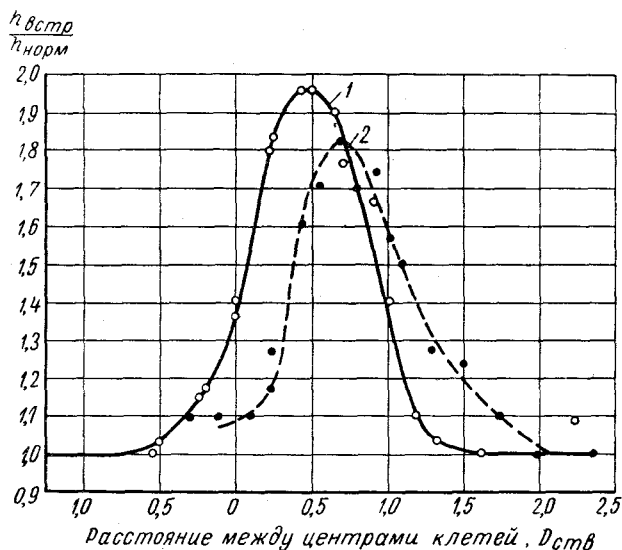


Рис. 7. Влияние взаимодействия движущихся клеток при встрече на депрессию рабочего участка модели.

1 — $v_{кл} = 0,311$ м/сек или 1,09 D/сек; 2 — $v_{кл} = 1,59$ м/сек или 5,5 D/сек.

Было подсчитано увеличение сопротивления типовых стволов, имеющих армировку, подобную армировке модели, оборудованных двухэтажными клетками, при $c = 1,32$. Результаты расчетов по формуле (16) приведены в таблице.

Длина ствола, при которой его сопротивление R_L равно сопротивлению двухэтажной клетки $R_{кл}$

$D_{ств}, м$	Грузоподъемность вагонетки *	α при профиле расстрела, н·сек ² /м ⁴		R_{100} при профиле расстрела, н·сек ² /м ⁸		Сечение ствола без лестничного отделения *, м ²	Размер клетки в плане *, м ²	ϕ	$R_{кл}, н·сек^2/м^8$	Длина ствола при $R_L = R_{кл}$ для профиля расстрела	
		двухэтажным	прямоугольным	двухэтажным	прямоугольным					двухэтажного	прямоугольного
4,5	10 000	380	314	0,0210	0,0173	14,3	2,61	0,183	0,00306	14,6	17,7
5	10 000	235	197	0,0109	0,009	15,8	2,61	0,165	0,00216	19,9	24
6	20 000	250	207	0,0037	0,00306	24,25	4,97	0,205	0,00131	35,5	43
6	20 000	204	170	0,003	0,0025	24,25	4,97	0,205	0,00131	44	52
6	30 000	250	207	0,0037	0,00306	24,25	5,90	0,243	0,00182	50	60
6,5 **	—	228	187	0,00207	0,0017	29,2	6,93	0,238	0,00122	59	72
6,5 ***	—	172	141	0,00156	0,00128	29,2	6,93	0,238	0,00122	78	95
7 **	—	176	145	0,00105	0,00086	34,5	6,93	0,200	0,00061	57	70

* Цифры из работы С. А. Федорова [4].

** При отсутствии бокового расстрела.

*** При отсутствии центрального расстрела.

ВЫВОДЫ

1. Среднее значение коэффициентов лобового сопротивления для двухэтажных клеток равно 1,32, одноэтажных — 1,18. При скорости движения воздуха в модели 13—21 м/сек ($Re = 260\,000 - 410\,000$) и клетки от 0,3 до 1,6 м/сек коэффициенты лобового сопротивления практически одинаковы.

2. При встрече клеток потери давления, затрачиваемые на преодоление их сопротивления, больше примерно в два раза потерь давления при рассредоточенном расположении клеток.

3. Сопротивление движущихся клеток в натуре эквивалентно сопротивлению стволов длиной от 15 до 100 м. Меньшее значение соответствует стволам меньшего диаметра.

4. В узких стволах сопротивление движущихся клеток в несколько раз превышает их сопротивление в широких стволах.

5. Движущиеся клетки увеличивают депрессию шахты незначительно. Так, при $D_{ств} = 4,5$ м, $Q = 115$ м³/сек, $R_{кл} = 3,06 \times 10^{-3}$ н · сек²/м³, $h_{кл} = 9,81$ н, $R_{кл} Q^2 = 41,2$ н/м², а для $D_{ств} = 6$ м, $Q = 195$ м³/сек, $R_{кл} = 1,82 \cdot 10^{-3}$ н · сек²/м³, $h_{кл} = 69$ н/м². Так как депрессии современных шахт доходят до 2500—3000 н/м², то потерями депрессии на преодоление сопротивления подъемных сосудов, составляющими 1,5—3% от $h_{ш}$, в большинстве случаев можно пренебречь.

6. В области автомодельности движения воздуха в шахтных стволах ($Re \geq 200\,000$) интенсивность работы подъема не оказывает влияния на сопротивление ствола.

ЛИТЕРАТУРА

1. С к о ч и н с к и й А. А., К о м а р о в В. Б. Рудничная вентиляция. Углетехиздат, 1959.

2. Б р е т о ш Р. А. Аэродинамическое сопротивление движению шахтных подъемных сосудов по вертикальным стволам. Уголь Украины, 1958, № 11.

3. С к о ч и н с к и й А. А., К с е н о ф о н т о в а А. И., Х а р е в А. А., И д е л ь ч и н И. Е. Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. Углетехиздат, 1953.

4. Ф е д о р о в С. А. Проходка и углубка вертикальных стволов шахт. Госгортехиздат, 1961.