ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 622.4

А. М. Цыба, Б.Л. Герике

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШАХТНОЙ КАЛОРИФЕРНОЙ УСТАНОВКИ

Исследованиями влияния скорости ветра на работу открытой безвентиляторной калориферной установки шахты «Грамотеинская» ОАО ОУК «Южкузбассуголь» установлено, что при скорости ветра более 10 м/с с подветренной стороны здания происходит движение нагретого воздуха в атмосферу [7]. По данным Гидрометцентра Кемеровской области, в Кузбассе в период с октября по апрель наблюдается до 116 дней (в среднем 62) с метелями, когда скорость ветра составляет более 10 м/с [4]. Это свидетельствует о том, что калориферная установка до трети отопительного периода работает с отступлениями от регламента по скорости ветра (3-4 м/с) [6]. Для соблюдения требований регламента необходимо снизить скорость потока воздуха на входе в калориферные секции в хотя бы два раза.

Для снижения лобового скоростного напора ветра и регулирования скорости воздушного потока, набегающего на здание калориферной установки, и проходящего через секции калориферов, предлагается ввести дополнительное аэродинамическое сопротивление в поток воздуха, тем самым обеспечить примерное равенство количества воздуха, проходящего через калориферные секции со всех сторон [8]. В качестве дополнительного аэродинамического сопротивления можно использовать полупроницаемый щит [7]. При обосновании его конструктивных параметров будем исходить из необходимости снижения скорости потока воздуха на входе в калориферные секции в два раза.

Проведем расчет скорости потока воздуха после преодоления им полупроницаемого щита исходя из законов механики жидкости и газов. Основной гипотезой механики жидкости и газов (воздуха) является гипотеза сплошной среды, в соответствии с которой жидкость, газ (воздух) представляются континуумом, непрерывно, без пустот заполняющим пространство [9]. Если на неподвижное тело набегает поток воздуха, то на него действует сила сопротивления воздуха, направленная по движению потока. Сила сопротивления вызывается, во-первых, трением воздуха о поверхность тела, во-вторых, изменением движения потока, вызванным телом. Сила сопротивления тела зависит от скорости потока, от размеров и формы тела.

Так как относительные перепады давления перед полупроницаемым щитом, в ячейках щита и после щита составляют не более 5 % (ниже данное предположение будет подтверждено), то можно пренебречь сжимаемостью воздуха, т.е. считать его плотность неизменной. В этом случае для расчетов применяются формулы для несжимаемых жидкостей [5].

Для расчета средней скорости потока воздуха за полупроницаемым щитом воспользуемся уравнением Д. Бернулли [5], которое дает связь между давлением, средней скоростью потока воздуха и геометрической высотой в различных сечениях потока:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \\ = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h = H = const \quad (1)$$

где z – геометрическая высота, характеризующая потенциальную энергию положения единицы веса воздуха (удельная энергия положения); второе слагаемое – пьезометрическая высота, характеризующая потенциальную энергию давления единицы веса воздуха (удельная энергия давления); третье – скоростная высота, характеризующая кинетическую энергию единицы веса воздуха (удельная кинетическая энергия); h – потерянная высота, характеризующая энергию единицы веса воздуха, затраченную на преодоление гидравлических сопротивлений на пути между двумя рассматриваемыми сечениями (удельная энергия, теряемая на пути от первого до второго сечения); α– коэффициент неравномерности распределения скоростей по сечению потока (коэффициент Кориолиса).

Если на пути движения потока воздуха установить аэродинамическое сопротивление, в нашем случае полупроницаемый щит, то движение воздуха будет безнапорное и горизонтальное ($p_1 = p_2, z_1 = z_2$), распределение скоростей по сечению потока воздуха – равномерное (α =1), скорость движения воздуха до сопротивления (V_1)

будет не равна скорости движения воздуха после сопротивления (V_2). Тогда уравнение Бернулли (1) примет вид:

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g} + h. \qquad (2)$$

Таким образом, за полупроницаемым щитом образуется область беспорядочного вихревого движения воздуха, где напор падает на величину потерь h.

Потери напора в полупроницаемом щите определяются по формуле Вейсбаха [1]:

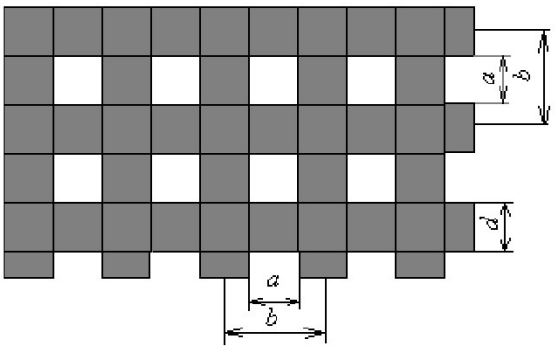
$$h = \varepsilon \frac{V^2}{2g}, \qquad (3)$$

где ε – коэффициент местного сопротивления полупроницаемого щита; V – средняя скорость воздуха в ячейках щита, м/с; g = 9,8 м/с^2.

Средняя скорость воздуха в ячейках щита определяется по формуле:

$$V = \frac{V_1}{m},$$

где $m=a^2/b^2$– коэффициент скважности полупроницаемого щита с квадратными ячейками; a – размер стороны ячейки щита, м; b – шаг ячеек, м (рис.). Форму ячеек щита примем квадратной, так как она не влияет на коэффициент местных сопротивлений, что установлено экспериментально [3].



Полупроницаемый щит с квадратными ячейками

Подставив (3) в (2), получим формулу для определения скорости потока воздуха после полупроницаемого щита:

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{\varepsilon V^2}{2g}, \qquad V_1^2 = V_2^2 + \frac{\varepsilon V_1^2}{m^2},$$
$$V_2 = V_1\sqrt{1 - \frac{\varepsilon}{m^2}}. \qquad (4)$$

Выражение

$$k = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon}{m^2}} \qquad (5)$$

назовем коэффициентом снижения скорости потока воздуха, проходящего через полупроницаемый щит. Тогда скорость потока воздуха после прохождения полупроницаемого щита выразим как:

$$V_2 = V_1 k.$$

Чтобы снизить скорость потока воздуха после щита вдвое, коэффициент снижения скорости k должен быть равен 0,5. Определим коэффициент местного сопротивления щита ε. Анализ литературных источников показал, что единой аналитической формулы для таких расчетов нет. Существуют только эмпирические формулы.

Н. С. Краснов разработал эмпирическую формулу для определения коэффициента сопротивления щита с квадратными ячейками [1]:

$$\varepsilon = \frac{92 - 78m}{Re} + 0{,}7(1{,}05 - m), \qquad (6)$$

где Re – число Рейнольдса.

Число Рейнольдса характеризует режим движения воздуха: ламинарный или турбулентный. При ламинарном движении воздух движется струйками или слоями без взаимного перемешивания. При турбулентном режиме происходит весьма сильное перемешивание частиц, которые помимо главного продольного движения совершают дополнительные сложные движения в поперечном направлении, т.е. сила вязкости мала.

Для щита с квадратными ячейками

$$Re = \frac{Va}{\nu},$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха.

Кинематическая вязкость воздуха представляет собой отношение абсолютной вязкости к плотности:

$$\nu = \mu / \rho$$

В международной системе единиц кинематическая вязкость воздуха измеряется в м^2/с, в системе CGS – Ст (стокс): 1 м^2/с = 1x10^4 Ст. Кинематическая вязкость воздуха зависит как от температуры, так и от давления, возрастая с увеличением температуры и уменьшаясь с увеличением давления [2]. Динамическая (абсолютная) вязкость воздуха (μ) характеризует степень его текучести или подвижности его частиц. Воздух легкоподвижен, его сопротивление сдвигу незначительно. Для определения величины динамической вязкости воздуха в системе МКГСС применим формулу Милликена [2]:

$$\mu = 1{,}745 \times 10^{-6} + 5{,}03 \times 10^{-9} t,$$

где t – температура воздуха. Тогда при t= -10°С ν =1,32x10^{-5} м^2/с [2].

Проведем расчеты Re при различных параметрах a, m и постоянных, в зависимости от скорости потока воздуха перед щитом, V_1 и ν по формуле:

$$Re = \frac{V_1 a}{m\nu}.$$

Результаты представлены в табл.1 и 2.

Таблица 1. Число Рейнольдса при скорости набегающего потока воздуха 8 м/с

	m = 0,6			m = 0,7			m = 0,8		
a , м	0,01	0,1	1,0	0,01	0,1	1,0	0,01	0,1	1,0
Re x10^5	0,10	1,01	100,10	0,09	0,87	8,66	0,08	0,76	7,58

Таблица 2. Число Рейнольдса при скорости набегающего потока воздуха 15 м/с

	m = 0,6			m = 0,7			m = 0,8		
a , м	0,01	0,1	1,0	0,01	0,1	1,0	0,01	0,1	1,0
Re x10^5	0,19	1,89	18,94	0,16	1,63	16,34	0,14	1,42	14,20

Как видим, Re во всех случаях больше критического значения, равного 900 [5], значит движение воздуха – турбулентное. С увеличением скорости набегающего потока воздуха (ветра) и размеров ячеек щита Re возрастает, а с увеличением коэффициента скважности уменьшается. Так как Re существенно больше 1 (около 10^5), то в расчетах ε , с достаточной для практических расчетов точностью, первым слагаемым в (6) можно пренебречь и пользоваться упрощенной формулой:

$$\varepsilon = 0{,}7(1{,}05 - m). \qquad (7)$$

Найдем граничное значение m , при котором полупроницаемый щит будет выполнять функцию сопротивления или гасителя скорости ветра в два раза, то есть в (5) k = 0,5:

$$\sqrt{1 - \frac{\varepsilon}{m^2}} = 0{,}5.$$

Решим квадратное уравнение:

$$1 - \frac{\varepsilon}{m^2} = 0{,}25. \qquad (8)$$

После подстановки (7) в (8) и преобразований, получим и решим квадратное уравнение:

$$0{,}75m^2 + 0{,}7m - 0{,}735 = 0,$$

$$m = \frac{-0{,}7 \pm \sqrt{0{,}7^2 - 4 \times 0{,}75 \times (-0{,}735)}}{2 \times 0{,}75},$$

$$m_1 = 0{,}628, m_2 = -1{,}561.$$

Таким образом, коэффициент скважности щита, равный 0,628, обеспечит снижение скорости ветра в два раза после прохождения через полупроницаемый щит.

Проведем расчет коэффициента сопротивления ε щита с квадратными ячейками по формуле Н. С. Краснова (6) при m=0,628 и изменяющихся размерах ячеек щита и скорости ветра с учетом Re (табл. 3 и 4).

Подставив ε =0,30 (табл. 4) в расчеты коэффициента снижения скорости потока воздуха, получим k = 0,5. Таким образом, число Рейнольдса действительно можно не учитывать в расчетах коэффициента снижения скорости потока воздуха.

Как было отмечено выше, мы пренебрегли сжимаемостью воздуха, считая его плотность неизменной, и для расчетов применили формулу (1) для несжимаемых жидкостей.

Таблица 3. Число Рейнольдса при m=0,628 (Re x10^5)

V_1 , м/с	a , м				
	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20
5,0	0,06	0,30	0,60	0,90	1,21
10,0	0,12	0,60	1,21	1,81	2,41
15,0	0,18	0,90	1,81	2,71	3,62
20,0	0,24	1,21	2,41	3,62	4,82
25,0	0,30	1,51	3,02	4,52	6,03

Таблица 4. Коэффициент сопротивления ε щита с квадратными ячейками (по формуле Н. С. Краснова)

V_1 , м/с	a , м				
	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20
5,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
10,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
15,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
20,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
25,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30

Проверим, действительно ли перепады давления перед полупроницаемым щитом, в ячейках щита и после щита составляют не более 5 %. Потери давления Δp определяются по формуле [5]:

$$\Delta p = \frac{\varepsilon \rho V^2}{2}.$$

Тогда с учетом (7) при атмосферном давлении 10^5 Па, m =0,628, ρ =1,293 кг/м^3 и скорости ветра 5 м/с потери давления составят 12 Па (0,01 %), при скорости ветра 25 м/с – 299 Па (0,3 %).

Рассмотрим полупроницаемый щит как сетчатый фильтр и определим ε по формуле А. Альтшуля при m =0,628 [9]:

$$\varepsilon = \left(\frac{1{,}1 - m}{1{,}2 - 1{,}56m + 0{,}46m^2} - m \right)^2. \qquad (9)$$

Коэффициента снижения скорости потока воздуха, рассчитанный по полученной нами формуле (5), составит:

$$k = \sqrt{1 - \frac{\varepsilon}{m^2}} = \sqrt{1 - \frac{0{,}30}{0{,}628^2}} = 0{,}5.$$

Коэффициенты различных местных сопротивлений, как правило, находят опытным путем. Для определения сопротивления в щите воспользуемся формулой А. А. Шейпака [9]:

$$\varepsilon = \frac{1}{M^2}\left[\left(\frac{1-e}{e}\right)^2 + (1-M)^2\right]\sin\beta, \quad (10)$$

где $M = \frac{a}{b} = \frac{a}{a+d} = \sqrt{m}$ (для квадратных ячеек, см. рис.); β=90º – угол наклона щита к горизонту; e=0.57+0.043 / (1.1-M) – коэффициент сжатия струи при проходе через щит. Тогда, при m = 0,628, M = 0,792, e = 0,71, ε = 0,34, k = 0,4

Эта формула применима для наших условий, когда силы вязкости малы (движение турбулентное) и не оказывают влияние на значение коэффициента ε, который с достаточной для практических расчетов точностью можно считать постоянным и зависящим только от геометрических параметров аэродинамического сопротивления, а не от числа Рейнольдса.

Таким образом, коэффициенты снижения скорости, полученные с учетом коэффициентов местных сопротивлений, рассчитанные по (7) и (9) совпадают, а по (10) существенно отличаются (20 %), в связи с чем необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Так как $m=a^2/b^2$, то $b = a/\sqrt{m}$, то при одной и той же скважности конструктивные параметры полупроницаемого щита могут быть разными (см. рис., табл. 5). Таким образом, конструктивные параметры дополнительного аэродинамического сопротивления можно определить только экспериментально.

Таблица 5. Размеры ячеек полупрозрачного щита при скважности m = 0,628

a, м	0,05	0,10	0,15	0,20
b, м	0,063	0,126	0,189	0,252
d, м	0,013	0,026	0,039	0,052

Выводы:

- при обосновании конструктивных параметров дополнительного аэродинамического сопротивления шахтной калориферной установки можно пренебречь сжимаемостью воздуха и применять формулы для несжимаемых жидкостей;
- так как форма ячеек щита не влияет на коэффициент местных сопротивлений, для простоты изготовления дополнительного аэродинамического сопротивления шахтной калориферной установки можно принять их квадратными;
- коэффициент местных сопротивлений ε, с достаточной для практических расчетов точностью, можно считать независящим от числа Рейнольдса, поэтому при расчетах конструктивных параметров щита можно использовать упрощенную формулу $\varepsilon = 0{,}7(1{,}05 - m)$;
- коэффициент снижения скорости потока воздуха зависит от конструктивных параметров дополнительного аэродинамического сопротивления;
- при одинаковой скважности конструктивные параметры полупроницаемого щита могут быть разными.

Задачи дальнейших экспериментальных исследований:

- установить, обеспечит ли дополнительное аэродинамическое сопротивление калориферной установки с расчетной величиной скважности полупроницаемого щита 0,628, снижение скорости воздушного потока на входе в проемы здания калориферной установки в два раза;
- установить влияние конструктивных параметров полупроницаемого щита на коэффициент снижения скорости потока воздуха при одинаковой скважности (0,628).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альтшуль, А. Д.* Гидравлические сопротивления. – М. : Недра, 1970. – 216 с.
2. *Альтшуль, А. Д.* Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости) / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1975. – 323 с.
3. *Альтшуль, А. Д.* Гидравлические сопротивления. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Недра, 1982. – 224 с.
4. Климат Кемеровской области // http://meteo-kuzbass.ru/pogoda/climat/january. Дата доступа 20.03.2012
5. Примеры расчетов по гидравлике. Учебное пособие для ВУЗов / Альтшуль А. Д. [и др.]. – М. : Стройиздат, 1976. – 255 с.
6. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – Макеевка : Донбасс, 1989. – 319 с.
7. *Цыба, А. М.* Шахтная калориферная установка с регулированием воздушных потоков в секциях // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: сб. тр. XIV Междунар. науч.-практич. конф. / Сибирское отделение РАН и др. – Кемерово, 2012. – С. 18-21.
8. *Цыба, А.М.* Повышение эффективности работы шахтной безвентиляторной калориферной установки / А. М. Цыба, Б. Л. Герике // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 4 (92). – С. 14-16.
9. *Шейпак, А. А.* Гидравлика и гидропневмопривод. Учебник. Ч. 1. Основы механики жидкости и газа. Из. 6-е, стереотип. – М. : МГИУ, 2007. – 264 с.

Авторы статьи:

Цыба
Александр Михайлович,
главный механик шахты «Грамотеинская» ОАО ОУК «Южкузбассуголь». Тел.: 8-903-943-2510

Герике
Борис Людвигович,
докт.техн.наук, проф. каф. горных машин и комплексов КузГТУ,
e-mail: gbl_42@mail.ru