ЭКОЛОГИЯ

Д. т. н. К. И. Логачёв (🖂), И. В. Крюков, к. т. н. О. А. Аверкова

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия

УДК 533.6:628.5]:662.997

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В АСПИРАЦИОННОМ УКРЫТИИ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ

С использованием численного и натурного экспериментов моделируется процесс рециркуляции воздуха в системе загрузочный канал – байпасная камера, установленной на входе в аспирационное укрытие.

Ключевые слова: аспирационное укрытие, рециркуляция, байпасирование.

ВВЕДЕНИЕ

■ аиболее надежным, но энергоемким способом локализации пылевыделений является применение аспирационных укрытий [1, 2]. Для снижения энергоемкости аспирационного укрытия необходимо снизить объемы аспирации, которые складываются из объема эжектируемого воздуха [3–6] и объема воздуха, поступающего через неплотности [7–15]. Один из способов снижения объема эжектируемого воздуха — байпасирование, при котором используется рециркуляция воздуха.

Цель работы — исследование явления рециркуляции воздуха при торцевом перетекании воздуха в системе загрузочный канал – байпасная камера, устанавливаемой на входе в аспирационное укрытие.

НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальная установка состоит из нижнего короба, выполненного из ДВП, верхнего короба (картонного), загрузочной трубы из ПВХ, цилиндрической байпасной камеры, скрученной из листового пластика ПЭТ. В нижнем коробе установлена вертикальная перегородка, разделяющая полость короба на приемную и аспирируемую. Загрузочная труба и байпасная камера соединяют нижний и верхний короба укрытия. Загрузочная труба закреплена на нижнем коробе посредством шпильки, проходящей через полость короба. На верхней крышке нижнего короба сделано круглое отверстие диаметром, равным диаметру байпасной камеры. Байпасная камера опирается на шпильку. Верхние части байпасной камеры и загрузочной трубы соедине-



ны шпилькой, которая не дает загрузочной трубе падать, и поддерживает ее соосно с байпасной камерой. Верхний короб с проделанным круглым отверстием надевается на байпасную камеру. В центре загрузочной трубы находится осевой вентилятор, который моделирует поток эжекционного воздуха. На боковой стенке нижнего короба (аспирируемая часть) установлен осевой вентилятор, удаляющий воздух из короба. Щели на соединениях заизолированы. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1 и 2. Для визуализации динамики воздушных потоков использовался дым, подаваемый через трубочку в байпасную камеру.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Вид сверху экспериментальной установки

При диаметре байпасной камеры 0,2 м и работе нагнетающего вентилятора дым поднимался вверх (рис. 3). Следовательно, в верхнем коробе и по всей длине байпасной камеры образовалось разряжение. При совместной работе вентиляторов (рис. 4) дым также двигался вверх, но настилаясь на боковую стенку байпасной камеры (настилание могло происходить из-за сильной подачи дыма). Измерения скорости воздуха термоанемометром при совместной работе вентиляторов показали, что скорость движения воздуха от стенки загрузочной трубы к стенке байпасной камеры возрастает. При работе вытяжного вентилятора наблюдался (рис. 5) эффект, аналогичный тому, который был при работе двух вентиляторов, только воздух двигался вниз по байпасной камере. Это показывает, что разряжение, создаваемое вытяжным вентилятором, действует не только в аспирируемой части короба, но и в приемной.

При задымлении байпасной камеры диаметром 0,25 м наблюдалось следующее. При работе нагнетающего вентилятора дым поднимался вверх, так же как и при совместной работе вентиляторов. При работе вытяжного вентилятора восходящий воздушный поток наблюдался в точке С (см. рис. 1). В точках В и А поток дыма, подаваемого через трубочку, не отклонялся, а лишь ударялся о стенку байпасной камеры и, уже рассеявшись, опускался вниз.

Задымление установки производилось также посредством создания дыма в приемной камере при поджигании горючего материала (бумаги). При работе нагнетающего вентилятора и совместной работе вентиляторов дым заполнял полость байпасной камеры и полость верхнего короба. Наблюдались также отрывы частиц прогоревшей бумаги, которые устремлялись в байпасную камеру. При работе нагнетающего вентилятора были замечены движение дыма в аспирируемую часть короба и выход его через отверстие, в котором установлен вытяжной вентилятор. Это показывает, что часть воздуха, подающегося в приемную камеру нагнетающим вентилятором, уходит в аспирируемую часть короба.

Были проведены измерения скорости воздуха в канале цилиндрической байпасной камеры при значениях ее диаметра 0,2, 0,25 и 0,3 м, размер *l* соответственно 0,175, 0,15, 0,125 м. Диаметр



Рис. 3. Движение дыма при работе нагнетающего вентилятора



Рис. 4. Движение дыма при совместной работе вентиляторов



Рис. 5. Работа вытяжного вентилятора

загрузочной трубы 0,1 м, так же как диаметр трубы, где установлен вытяжной вентилятор.

Скорости воздуха в загрузочной трубе измеряли термоанемометром «Testo 425». Скорость воздуха в загрузочной трубе при работе нагнетающего осевого вентилятора изменялась в зависимости от глубины погружения прибора и была максимальной у внутренней стенки трубы. Это объясняется тем, что осевой вентилятор не нагнетает воздух равномерно по сечению трубы, а «разбрасывает» его по внутренним стенкам. Средняя скорость подачи воздуха составила 4 м/с.

58

Скорость в канале байпасной камеры измеряли на расстоянии 1,0–1,5 см от стенки загрузочной трубы в трех точках (А, В, С). Точки А и С удалены от краев байпасной камеры на 10 см. Точка В находится в середине длины байпасной камеры на расстоянии 60 см от верхнего короба. Согласно полученным значениям скорость воздуха при движении из нижней точки в верхнюю уменышается. Среднее значение скоростей воздуха в точках А и С приблизительно равно скорости в точке В. Значения скоростей при различных диаметрах байпасной камеры приведены в табл. 1.

Значения скоростей при совместной работе вентиляторов практически не отличались от значений, полученных при работе лишь нагнетающего вентилятора. При приближении измерительного элемента к внутренней стенке байпасной камеры наблюдался рост скорости воздуха до 3-4 м/с. При работе одного нагнетающего вентилятора таких резких изменений скорости не наблюдалось. Задымление байпасной камеры при совместной работе вентиляторов показало, что воздух движется вверх.

Представляло интерес определить влияние рециркуляции на скорость v₃ вытесняемого из укрытия воздуха. Для этого рассматривали случаи с перекрытием байпасной камеры (отсутствие рециркуляции) и без ее перекрытия (присутствие рециркуляции). Байпасную камеру перекрывали в верхней части. В обоих случаях работал только нагнетающий вентилятор. Вытяжной вентилятор был выключен. Скорость *v*₃ измеряли в различных точках сечения выхода из укрытия и усредняли. Замеры проводились при глубине погружения прибора 1,0-1,5 см на расстоянии 5 см от стенки крепления вентилятора. Измерения проводили при наличии верхнего короба и без него (табл. 2). Как видно из результатов, рециркуляция воздуха оказывает существенное влияние на скорость воздуха, вытесняемого из укрытия.

Величина $\delta = (v_3^c - v_3^b)/v_3^c \cdot 100 \%$ снижения скорости v_3^b без перекрытия байпасной камеры относительно скорости v_3^c воздуха с перекрытием байпасной камеры существенна и достигает наибольшего значения при диаметре D_6 байпасной камеры 0,20–0,25 м.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Вычислительный алгоритм строился на основе метода граничных интегральных уравнений [16].

По границе *S* области течения непрерывно размещались фиктивные источники (стоки) неизвестной заранее интенсивности *q*(ξ). Их величины должны быть таковы, чтобы их суммарное воздействие на точки границы индуцировало в них заданные значения нормальной составляющей скорости, т. е. выполнялись граничные условия.

Значение скорости в произвольной точке х области вдоль единичного вектора n определится из следующей формулы:

$$v_n(x) = \int F_2(x,\xi) q(\xi) dS(\xi),$$
(1)

где $S(\xi)$ означает, что ξ является переменной интегрирования; функция $F_2(x,\xi) = \frac{1}{2\pi} \frac{(x_1 - \xi_1)n_1 + (x_2 - \xi_2)n_2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2}$ выражает влияние на точку $x(x_1, x_2)$ единичного источника, расположенного в точке ξ (ξ_1 , ξ_2) вдоль единичного вектора $h = \{n_1, n_2\}$.

Формула (1) являлась бы решением задачи, если бы интенсивности $q(\xi)$ были известны. Для их определения устремим внутреннюю точку x к граничной точке x_0 вдоль направления внешней нормали. Получим следующее выражение:

$$v_n(x_0) = \int_{S}^{*} F_2(x_0,\xi) q(\xi) dS(\xi),$$
(2)

где интеграл имеет особенность, что обозначено *. Действительно, $\lim_{x_0 \to \xi} F_2(x_0, \xi) = \infty$. Такое интегральное уравнение называется сингулярным.

······································											
<i>D</i> _б , м	Работа нагнетающего вентилятора		V _{cp} ,	Q _{цир} ,	Совместная работа вентиляторов			V _{cp} ,	<i>Q</i> _{цир} ,	η	
	A	В	С	M/C	M°/C	Α	В	С	M/C	M°/C	
0,2	1,02	1,08	1,2	1,11	91,4	1,0	1,074	1,19	1,09	91,0	2
0,25	0,67	0,73	0,96	0,81	108,3	0,49	0,6	0,87	0,68	89,0	2,5
0,3	0,34	0,45	0,7	0,52	101,7	0,32	0,35	0,49	0,4	79,1	3
* <i>D</i> ₅ — диаметр байпасной камеры; ν _{ср} — средняя скорость воздуха; <i>Q</i> _{цир} — объем циркулируемого воздуха; η — отношение											

Габлица 1. Экспериментальные значения с	коростей возлуха в цили	индрической байпасной камере*

T-6
диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы. При расчете $Q_{ ext{map}}$ принимались значения скорости в точке В.
* <i>D</i> ₆ — диаметр байпасной камеры; <i>v</i> _{cp} — средняя скорость воздуха; <i>Q</i> _{шир} — объем циркулируемого воздуха; η — отношение

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·							
<i>D</i> _б , м	Б	ез верхнего короб	ía	С верхним коробом			
	<i>v</i> ^b ₃ , м/с	<i>V</i> ^{<i>c</i>} ₃ , м/с	δ*, %	ν ^b ₃ , м/с	<i>V</i> ^{<i>c</i>} ₃ , м/с	δ*, %	
0,15	1,32	2,76	52	0,76-0,78	1,12	30-32	
0,20	0,78	2,4	68	0,45-0,48	0,77	38-42	
0,25	0,57	1,95	71	0,41	0,55	34	
0,30	0,44	1,33	67	0,3-0,37	0,47	21-36	
* δ — относительная погрешность.							

Однако интеграл в выражении (2) является сходящимся. Если окружить точку ξ полуокружностью бесконечно малого радиуса и вычислить интеграл по ней, то он будет равен – $\frac{1}{2}q(x_0)$.

Таким образом, получим

M

$$v_n(x_0) = -\frac{1}{2} q(x_0) + \int_S F_2(x_0, \xi) q(\xi) dS(\xi),$$
(3)

где интеграл уже не содержит точку $x_0 = \xi$.

Граничное интегральное уравнение (3) является интегральным уравнением Фредгольма 2-го рода. Аналитически оно не решается для областей с произвольными границами, поэтому применяется следующий численный метод его решения. Граница области течения разбивается на прямолинейные отрезки (граничные элементы). Вдоль каждого из отрезков интенсивность источников (стоков) не изменяется. Тогда, записав уравнение (3) для середин x_0^p каждого *p*-го из *N* полученных отрезков, получим систему *N* линейных алгебраических уравнений с *N* неизвестными $q(\xi^1), q(\xi^2), K, q(\xi^N)$:

$$-\frac{1}{2}q(x_0^p) + \sum_{\substack{k=1,\\k\neq p}}^{N} q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x_0^p, \xi^k) \, dS(\xi^k) = v_n(x_0^p), \ p = 1, 2, K, N, (4)$$

где ξ^k — произвольная точка *k*-го отрезка; Δ*S^k* — *k*-й отрезок.

Решив эту систему уравнений и определив неизвестные интенсивности источников (стоков), можно определить искомую скорость во внутренней точке вдоль заданного направления по формуле

$$v_n(x) = \sum_{k=1}^{N} q(\xi^k) \int_{\Delta S^k} F_2(x, \xi^k) \, dS(\xi^k).$$
(5)

На основе приведенных основных расчетных соотношений была разработана компьютерная программа, с помощью которой был выполнен ряд вычислительных экспериментов, соответствующих ранее выполненным натурным.

Для сведения задачи к плоскости (рис. 6) круги преобразовывались в прямоугольники с длиной равной 0,275 м. Например, радиус загрузочной трубы, как и радиус трубы, где установлен вытяжной вентилятор, будет соответствовать полуширине $a = \pi R_r^2 / (2 \cdot 0,275) =$ $= \pi \cdot 0,05^2/0,55 = 0,14$ м; величина $b = \pi R_r^2 / (2 \cdot 0,275)$.

Граница области дискретизировалась набором около 11000 прямолинейных отрезков. Скорость v₁ = 4 м/с постоянна для всех вычислительных экспериментов.

Вычислительные эксперименты при постоянном радиусе байпасной камеры $R_6 = 0,1$ м (рис. 7) и разной скорости v_3 в вытяжной трубе показали, что скорость рециркулируемого воздуха в байпасной камере (табл. 3) снижается при увеличении скорости вытяжки v_3 . При $v_3 = v_4 = 4$ м/с рециркуляции не наблюдается. Заметим также, что при увеличении v_3 уменьшается область рециркуляции и в самом аспирационном укрытии, которая еще заметна на рис. 7, *a*, *б*. При дальнейшем увеличении скорости этой рециркуляционной области внутри укрытия не наблюдается. При увеличении радиуса байпасной камеры и постоянной скорости вытяжки v₃ (рис. 8) скорости в характерных точках байпасной камеры снижаются (см. табл. 3), что согласуется с экспериментальными замерами (см. табл. 1).



Рис. 6. Сведение задачи к плоскости

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При снабжении загрузочного канала аспирационного укрытия байпасной камерой, где перетекание воздуха осуществляется на их торцах, возникает рециркуляция воздуха. Экспериментально доказано, что явление рециркуляции воздуха способствует снижению расхода воздуха, вытесняемого из укрытия, а значит, и объема эжектируемого воздуха. Наиболее рациональным представляется соотношение диаметра байпасной камеры к диаметру загрузочной трубы 2,0–2,5. В этом случае объем эжектируемого воздуха может быть снижен не менее чем на 40 %.

В результате численного и натурного экспериментов показано, что скорость рециркуляционного воздуха снижается при увеличении радиуса байпасной камеры. Величины скорости удовлетворительно согласуются и отличаются друг от друга не более чем на 20 %. Вычислительный эксперимент показывает, что при уве-

Таблица	3.	Величины	скорости	В	характерных
точках б	іай	пасного кан	ала, м/с		

Рисунок	VA	$\nu_{\rm B}$	Vc
7, a	1,18	1,19	1,18
7, б	0,945	0,962	0,944
7, в	0,612	0,624	0,612
7, г	0,279	0,287	0,281
7,∂	0	0	0
8, a	0,78	0,80	0,78
8, б	0,487	0,505	0,489



Рис. 7. Линии тока в аспирационном укрытии при $R_6 = 0,1$ м: a-r — начало; ∂ — окончание



Рис. 8. Линии тока при разных радиусах байпасного канала $R_{\rm 6}$, м: a = 0,125; $\delta = 0,15$

личении скорости воздуха, отсасываемого из аспирационного укрытия, скорость рециркуляции снижается вплоть до нуля. Однако натурный эксперимент такого явления не улавливает.

Библиографический список

1. *Logachev, I. N.* Industrial air quality and ventilation: controlling dust emissions / *I. N. Logachev, K. I. Logachev.* — Boca Raton : CRC Press, 2014. — 417 p.

2. Логачев, И. Н. Способы и средства снижения энергоемкости аспирационных систем при перегрузках сыпучих материалов / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2013. — № 6. — С. 66–70.

Logachev, I. N. Methods and means of reducing the power requirements of ventilation systems in the transfer of free-flowing materials / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova // Refractories and Industrial Ceramics. -2013. -Vol. 54, Ne 3. -P. 258-262.

3. Логачёв, И. Н. Методы снижения энергоемкости систем аспирации. Часть 1. Вывод гидродинамических уравнений эжекции воздуха потоком сыпучего материала в перфорированном желобе с байпасной камерой / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 2. — С. 51-56.

Logachev, I. N. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 1. Derivation of hydrodynamic equations of air ejection by a stream of free-flowing material in a perforated trough with bypass chamber / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics — 2014. — Vol. 55, \mathbb{N} 1. — P. 70–76.

4. Логачёв, И. Н. Методы снижения энергоемкости систем аспирации. Часть 2. Определение эффективности использования рециркуляционных течений / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2014. — № 4. — С. 60-64.

Logachev, I. N. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 2. Determining the efficiency of recirculating flows / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 2. — P. 164–168.

5. Логачёв, И. Н. Методы снижения энергоемкости систем аспирации. Часть 3. Расчет погрузочного устройства и предложения по его совершенствованию / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова // Новые огнеупоры. — 2014. — № 6. — С. 57-61.

Logachev, I. N. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 3. Design of loading device and suggestions for its improvement / *I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 255–260.

6. Логачёв, И. Н. Методы снижения энергоемкости систем аспирации. Часть 4. Теоретические предпосылки создания пылелокализующих устройств с закрученными воздушными потоками / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 8. — С. 53-58.

Logachev, I. N. Methods of reducing the power requirements of ventilation systems. Part 4. Theoretical prerequisites for the creation of dust localizing devices with swirling air flows / I. N. Logachev, K. I. Logachev, O. A. Averkova [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. -2014. -Vol. 55, Nº 4. -P. 365-370.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-41-08005р_офи_м) и совета по грантам Президента Российской Федерации (проект МК-103.2014.1).

* *

7. **Аверкова**, **О. А.** Численное моделирование воздушных течений на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, В. Ю. Зоря, И. Н. Логачёв [и др.] // Новые огнеупоры. — 2010. — № 5. — С. 31–36.

Averkova, O. A. Numerical simulation of air currents at the inlet to slot leaks of ventilation shelters / *O. A. Averkova, V. Yu. Zorya, I. N. Logachev* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 3. — P. 177–182.

8. **Аверкова, О.** А. Моделирование отрыва потока на входе в щелевые неплотности аспирационных укрытий / О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв // Новые огнеупоры. — 2012. — № 10. — С. 56-60.

9. *Аверкова, О. А.* Моделирование отрывных потоков на входе в круглые всасывающие каналы с кольцевыми экранами / О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв [и др.] // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 57–61.

Averkova, O. A. Modeling detached flows at the inlet to round suction flues with annular screens / O. A. Averkova, I. N. Logachev, K. I. Logachev [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 425–429.

10. Логачёв, И. Н. Моделирование отрывных течений вблизи всасывающей щели / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, В. Ю. Зоря [и др.] // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 1. — С. 43-52.

11. Логачёв, И. Н. Математическое моделирование отрывных течений при входе в экранированный плоский канал / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова / Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 1. — С. 68-77.

12. Логачёв, И. Н. Математическое моделирование струйного течения воздуха при входе в плоский канал с козырьком и непроницаемым экраном / И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв, О. А. Аверкова // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11, № 2. — С. 160–167.

13. **Аверкова, О. А.** Моделирование потенциальных течений с неизвестными границами на основе стационарных дискретных вихрей / О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв // Вычислительные методы и программирование. — 2011. — Т. 12, № 2. — С. 213-219. 14. **Аверкова, О. А.** Моделирование отрыва потока на входе во всасывающие каналы в областях с разрезами / О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв // Вычислительные методы и программирование. — 2012. — Т. 13, № 2. — С. 298-306.

15. **Аверкова, О. А.** Закономерности отрывного течения при входе в выступающий канал с экранами / О. А. Аверкова, И. Н. Логачёв, К. И. Логачёв [и др.] // Ученые записки ЦАГИ. — 2013. — Т. 44, № 2. — С. 33–49.

Averkova, O. A. The principles of separated flow at the inlet of the protruding duct with screens / O. A. Averkova, I. N. Logachev, K. I. Logachev [et al.] // TsAGI Science Journal. — 2013. — № 2. — P. 219–243.

16. **Бреббия, К.** Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. — М. : Мир, 1987. — 525 с. ■

Получено 05.02.15

© К. И. Логачёв, И. В. Крюков, О. А. Аверкова, 2015 г.

62