

# ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Аверкова О.А., канд. техн. наук, доц.,  
Крюков И.В., аспирант,  
Толмачева Е.И., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЖЕКЦИИ ВОЗДУХА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ С БАЙПАСНОЙ КАМЕРОЙ\*

Рассматривается динамика воздушных потоков в непроницаемой круглой трубе, расположенной внутри цилиндрической байпасной камеры. Эжектирующее действие потока сыпучего материала имитируется с помощью вентилятора, расположенного внутри трубы. Численное моделирование осуществляется с помощью метода граничных интегральных уравнений и разработанной на его основе компьютерной программе. Производится сравнение численных и натурных экспериментов.

**Ключевые слова:** аспирация, перегрузка сыпучих материалов, эжекция воздуха, байпасная камера.

**Введение.** Для снижения объема эжектируемого воздуха и производительности системы аспирации используют свойства рециркуляции воздушных потоков в системе «загрузочная труба - байпасная камера» [1-5]. В виду сложности проведения экспериментов с многофазными потоками создание имитационных моделей представляет значительный научный и практический интерес как для натурального, так и вычислительного экспериментов. Целью настоящей работы является создание натурной и компьютерной моделей эжекции воздуха в круглой непроницаемой трубе с байпасной камерой.

### 1. Натурный эксперимент

Экспериментальная установка (рис.1,2) состоит из нижнего короба, выполненного из ДВП, одна из сторон которого выполнена из прозрачного оргстекла, верхнего короба (картонный короб), загрузочной трубы (труба из ПВХ), цилиндрической байпасной камеры, скрученной из листа ПЭТ. Загрузочная труба и байпасная камера соединяют нижний и верхний короба укрытия. Загрузочная труба закреплена на нижнем коробе посредством шпильки, проходящей через всю полость короба. На верхней крышке нижнего короба сделано круглое отверстие диаметром равным диаметру байпасной камеры. Байпасная камера опирается на шпильку. Верхняя часть байпасной камеры и загрузочной трубы соединены шпилькой, которая не дает загрузочной трубе падать, и поддерживает ее соосно с байпасной камерой. Верхний короб с проделанным круглым отверстием одевается на

байпасную камеру. В центре загрузочной трубы находится осевой вентилятор, который моделирует поток эжектируемого воздуха. Щели на соединениях изолированы.

Исследование процессов циркуляции воздуха в цилиндрической байпасной камере осуществлялось при следующих исходных данных: приемная камера с размерами 0,45 м × 0,4 м × 0,55 м; загрузочная труба и байпасная камера длиной 1,2 м; радиус загрузочной трубы  $R_{тр} = 0,05$  м; радиус байпасной камеры имел три значения:  $R_6 = 0,075$  м; 0,1 м; 0,15 м; производительность вентилятора  $Q = 0,028$  м<sup>3</sup>/с,  $P = 35$  Па.

Производились измерения значений давления  $P$  и скорости воздуха  $v$  в каналах цилиндрической байпасной камеры. Скорость воздуха в загрузочной трубе определим по формуле, зная расход воздуха  $Q$  и диаметр загрузочной трубы:  $v = Q / (\pi R_{тр}^2) \approx 3,7$  м/с.

Натурный эксперимент подтвердил наличие рециркуляции воздуха. **Воздушный** поток в трубе движется вертикально вниз, при выходе из трубы меняет свое направление в байпасной камере и движется вверх, затем снова всасывается в трубу.

Измерение давления (табл. 1) проводилось микроманометром ММН-240. Здесь введено обозначение  $\eta = R_6 / R_{тр}$ . Замеры производились в нижнем коробе, в нижней точке байпасной камеры на расстоянии 5 см от верхней крышки нижнего короба, в верхней точке бай-

пасной камеры на расстоянии 5 см от нижней крышки верхнего короба и в верхнем укрытии. Ввиду очень малых значений давлений измере-

ния проводились при наклоне трубки со значением коэффициента  $K=0,2$ .

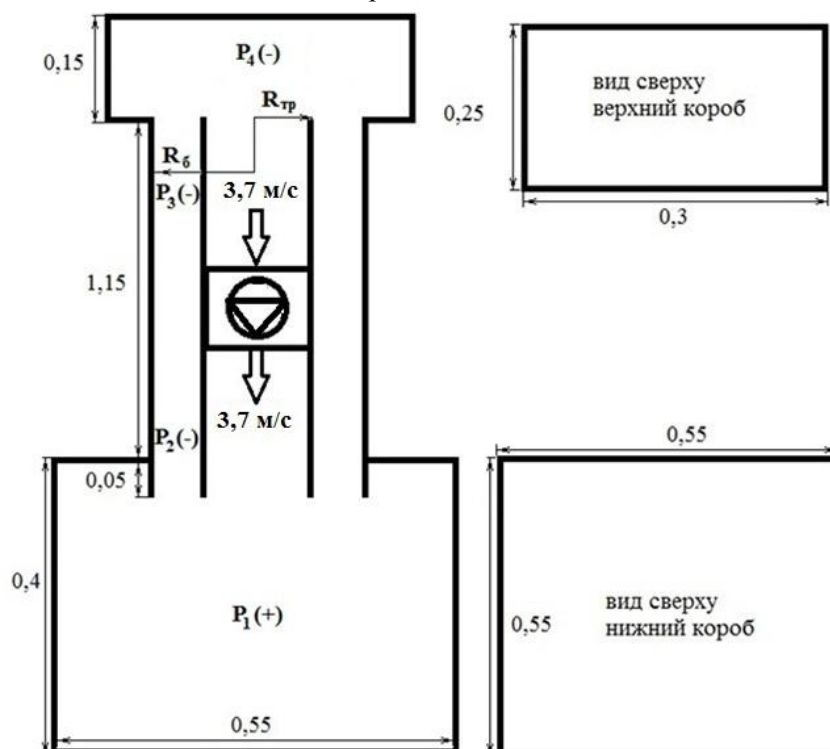


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Таблица 1

Эмпирические значения давлений при значении коэффициента  $K=0,2$

$\eta$	$P, \text{ кгс/м}^2$	$P_1 (+)$	$P_2 (-)$	$P_3 (-)$	$P_4 (-)$
1,5		2	4,5	4,5	4,5
2		$\leq 1$	1	1	1
3		$\leq 0,5$	0,5	0,5	0,5



Рис. 2 Фото экспериментальной установки

Знак «+» и «-» в скобках означает избыточное давление и разрежение соответственно. Погрешности в значениях давления  $P_1$  объясняются отсутствием повышения эжекционного давления во время падения материала и наличием неплотностей. Давления  $P_2 - P_4$  одинаковые, т.к. разрежение создаваемое вентилятором гидравлически связывает байпасную камеру и верхний короб укрытия. Значение разрежения вентилятора в трубе составляет  $7 \text{ кгс/см}^2$ .

Измерения скорости проводились термоанемометром testo 425 в точке, расположенной в центре кольца между трубой и байпасной камерой в сечении на расстоянии 0,55 м от нижнего короба (сечение, где находится вентилятор). Измерения усредненных значений прибора проводились 7 раз каждый в течение 1 минуты.

## 2. Вычислительный эксперимент

Вычислительный алгоритм строился на основе метода граничных интегральных уравнений [7-8].

По границе  $S$  области течения непрерывно

размещались фиктивные источники (стоки) неизвестной заранее интенсивности  $q(\xi)$ . Их величины должны быть таковы, чтобы их суммарное воздействие на точки границы индуцировало в них заданные значения нормальной составляющей скорости, то есть выполнялись граничные условия.

Значение скорости в произвольной точке  $x$  области вдоль единичного вектора  $\vec{n}$  определится из следующей формулы:

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

где  $S(\xi)$  обозначает, что  $\xi$  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 собой влияние на точку  $x(x_1, x_2)$  единичного источника, расположенного в точке  $\xi(\xi_1, \xi_2)$  вдоль единичного вектора  $\vec{n} = \{n_1, n_2\}$ .

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

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 элемен-

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

$\xi^k$  - произвольная точка  $k$ -го отрезка,  $\Delta S^k$  -  $k$ -ый отрезок.

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

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

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

Линии тока для случая  $R_{np} = 0,05\text{м}$ ;  $R_g = 0,15\text{м}$  изображены на рис.3.а. Вычислительный эксперимент улавливает зону рецирку-

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

$$v_n(x_0) = \int_S^* F_2(x_0, \xi) q(\xi) dS(\xi), \quad (2)$$

где интеграл имеет особенность, что обозначено \*. Действительно  $\lim_{x_0 \rightarrow \xi} F_2(x_0, \xi) = \infty$ . Такое

интегральное уравнение называется сингулярным. Однако интеграл в выражении (2) является сходящимся. Если окружить точку  $\xi$  полукругом бесконечно малого радиуса и вычислить интеграл по ней, то он будет равен  $-\frac{1}{2} q(x_0)$ .

Таким образом, получим:

ты). 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  $q(\xi^1), q(\xi^2), \dots, q(\xi^N)$ :

ляции, зона восходящего потока воздуха наблюдается, но величина скорости в байпасной трубе значительно превышает экспериментально наблюдаемое: 1,8 м/с против 0, 43 м/с. Это связано с некорректным сведением трехмерной задачи к плоской. Отмеченная некорректность устранялась следующим образом.

В качестве характерного размера выбиралась полуширина нижнего короба равная 0,275м. Таким образом при сохранении расхода воздуха круглая труба преобразовывалась в прямоугольное с длиной 0,275м и полушириной  $l$ , определяемой из выражения  $\pi R^2 = 0,275l$ . Сравнение вычисленных значений скорости с экспериментальными показывает их удовлетворительное согласование (табл.2). Линии тока при этом имеет вид, изображенных на рис. 2б-г.

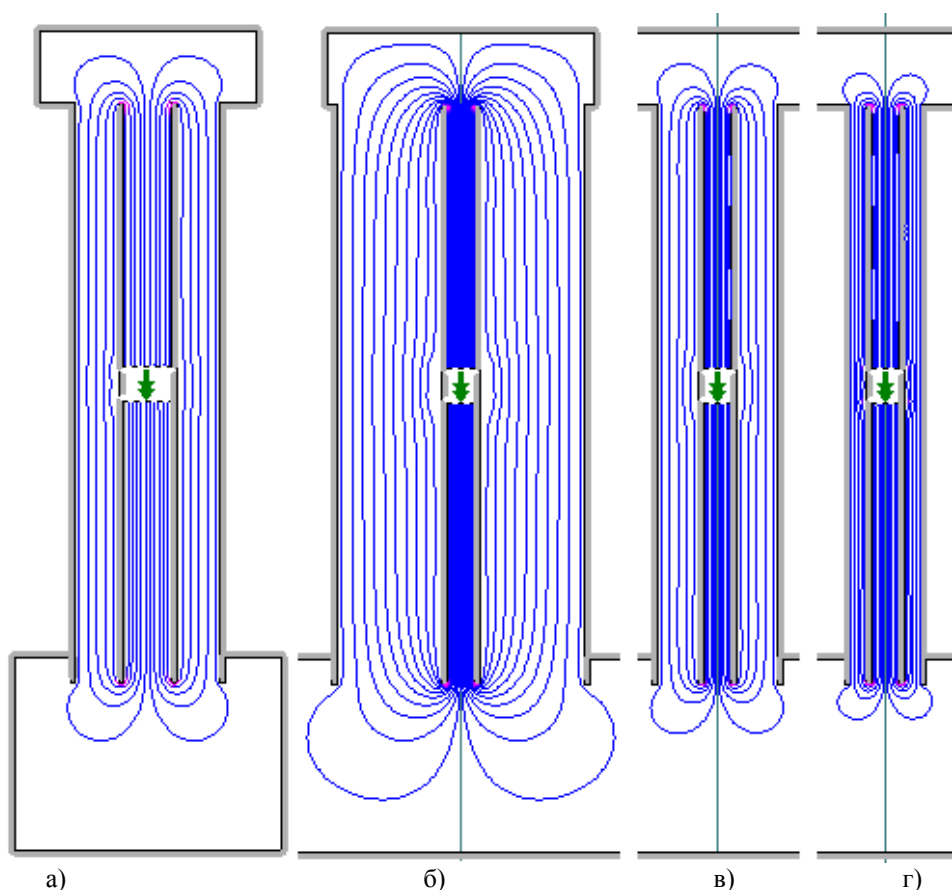


Рис.3. Линии тока в зоне рециркуляции: а)  $R_0 = 0,15$  м; б)  $l_0 = 0,257$  м; в)  $l_0 = 0,124$  м; г)  $l_0 = 0,074$  м

Таблица 2

**Сравнение расчетных и экспериментальных величин скорости**

$\eta$	$R_0$ , м	$l_0$ , м	$v_{\text{эксп}}$ , м/с	$v_{\text{числ}}$ , м/с	$v_a$ , м/с
0,075	0,075	0,074	2,25	2,635	2,8
0,1	0,1	0,124	1,075	1,117	1,167
0,15	0,15	0,257	0,45	0,43	0,438

**Заключение**

В процессе физического и вычислительного экспериментов исследована рециркуляция воздуха в системе «загрузочная труба - байпасная камера». Определены значения скорости и давлений в байпасной камере. Получено удовлетворительное согласование значений скорости, найденных экспериментальных и вычислительным путем.

*\*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект №14-08-31069-мол\_а), Совета по грантам Президента РФ (проект МК-103.2014.1) и грант РФФИ №14-41-08005р\_офи\_м.*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 1. Уравнения

динамики эжектируемого и рециркулируемого воздуха // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 10. С. 46-53;

2. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 2. Линеаризация дифференциальных уравнений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. № 11-12. С. 62-70;

3. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А. Эжекция воздуха ускоренным потоком частиц в перфорированном вертикальном канале с байпасной камерой. Сообщение 3. Численный эксперимент и результаты исследований // Известия высших учебных заведений. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 1. С. 79-87.

4. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Крюков И.В. Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбиниро-

ванной байпасной камерой. Сообщение 1. Основные уравнения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 4. С. 62-71.

5. Логачев И.Н., Логачев К.И., Аверкова О.А., Крюков И.В. Особенности рециркуляции воздуха в перегрузочном желобе с комбинированной байпасной камерой. Сообщение 2. Решение уравнений и результаты расчета // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 5. С. 54-62.

6. Логачев И.Н., Логачев К.И. Аэродинамические основы аспирации. СПб.: Изд. Химиздат, 2005. 659 с.

7. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. - М.: Изд. Мир, 1987. 525 с.

8. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов к технике. - М.: Изд. Мир, 1982. 248 с.