

УДК 621.184.85, 629.048.4, 697.92

к.т.н. Ткачѳв М. Ю.

(АДИ ДонНТУ, г. Горловка, ДНР, mishel-tkachev@ya.ru)

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭВАКУАЦИИ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ

Рассмотрена конструктивная схема и методика расчета энергосиловых параметров системы эвакуации газопылевых выбросов от источников их образования, состоящей из 3-х узлов безлопастного вентилятора, принцип действия которых основан на эффектах Коанда и торнадо. Полученные зависимости позволяют определить скорости течения исходных и индуцированного вихревыми кольцами газовоздушных потоков, распределение давления внутри и вне сечения формируемых вихрей, а также обеспечиваемые системой расходы газовоздушной смеси.

Ключевые слова: безлопастный вентилятор, эффект Коанда, вихрь Рэнкина, теория вихревого движения, скорость, давление, расход.

Работа машин и механизмов, реализующих современные производственные процессы, протекает в интенсивных режимах и сопровождается выделением значительного количества вредных веществ в виде паров, пылевидных частиц и различных газов от них. Данные вещества, в частности оксиды азота, углерода, серы и т. п., распространяясь в объеме помещений, зданий и сооружений, вызывают изменение состава воздушной среды и тем самым представляют опасность для здоровья человека, а также оказывают отрицательное влияние на производительность его труда. Для исключения вредного воздействия на атмосферу производственных помещений и создания благоприятных условий труда, которые соответствовали бы санитарно-гигиеническим нормативам, на рабочих местах внутри них используют вентиляцию.

Создание конструктивно простого и высокоэффективного с энергетической точки зрения оборудования в этой области является актуальной задачей. Частично ее решение было достигнуто, в частности, при разработке узла безлопастного вентилятора, предназначенного для эвакуации пылегазовых образований от источников их происхождения [1–3], в основе принципа действия которого лежат аэродинамические эффекты Коанда и торнадо. Актуальным

направлением этих исследований [4] является дальнейшее совершенствование концепции построения систем данного класса и обоснование их рациональных конструктивных и энергосиловых параметров для устранения присущих им недостатков, среди которых наибольшее распространение получили нерациональность траекторий воздушных потоков, обратный ток струй и образование застойных зон.

Целью данной работы является разработка системы эвакуации газопылевых выбросов за счет новой структурной взаимосвязи входящих в состав компонентов — узлов безлопастных вентиляторов, — направленная на расширение функциональных возможностей, повышение показателей ее работы, в частности расширение рабочей зоны.

Задачей данной работы являлось обоснование аэродинамических характеристик системы эвакуации газопылевых выбросов новой конструкции.

Объект исследования — процесс индуцирования системой устойчивого газовоздушного потока заданной конфигурации замкнутыми вихревыми кольцами входящих в ее состав компонентов с учетом положений теории вихревого движения.

Предмет исследования — аналитическое и эмпирическое обоснование методики определения энергосиловых параметров

системы — скорости течения газозвушных потоков, распределения давления внутри и вне сечения формируемых вихрей, а также исходного и индуцированного системой расходов газозвушной смеси.

Узел безлопастного вентилятора (рис. 1, 2) [1] включает подсистему вытяжки, образованную полыми сегментами 1, прикрепленными посредством кронштейнов 2 к круглым фланцам 3 несущего кольца 4 с возможностью относительного фиксированного поворота в радиальной плоскости и сообщающимися посредством гибких рукавов 5 с полостью торообразной газораспределительной камеры 6, которая размещена концентрически относительно несущего кольца и снабжена подводным патрубком 7.

На входе подсистемы, образованной полыми сегментами 1 со щелевым соплом и поверхностью Коанда, размещена подсистема завихрения потоков, включающая полые сегменты 8, закрепленные последовательно по окружности на несущей шайбе 9 в плоскости, перпендикулярной ее продольной оси. Полости сегментов 8 посредством трубопроводов 10 сообщаются с торообразной камерой 11, имеющей подводный патрубок 12.

Принцип работы безлопастного вентилятора следующий. При отдельной подаче сжатого воздуха через подводные патрубки 7 и 12 соответственно в газораспределительные камеры 6 и 11 он по гибким рукавам 5 и трубопроводам 10 будет одновременно поступать в полости сегментов 1, образующих горловину, и сегментов 8, размещенных по окружности на несущей шайбе 9. Воздух, истекающий с большой скоростью из щелевых сопел сегментов 1, возбуждает первичные газовые потоки, направленные по поверхностям Коанда, которые создают зону пониженного давления, благодаря чему воздушные массы, находящиеся перед горловиной, всасываются в нее и выбрасываются вперед по ходу потока. Скорость этого потока можно регулировать с помощью изменения фокусировки

горловины путем поворота и последующей фиксации под оптимальным углом кронштейнов 2 с сегментами 1 относительно круглых фланцев 3 несущего кольца 4. В свою очередь, воздух, истекающий из щелевых сопел сегментов 8, огибает их внутренние поверхности Коанда и закручивает движущийся в горловину поток, возбуждая эффект торнадо, усиливающий приток к горловине вентилятора воздушных масс из окружающего пространства. При этом максимальная производительность вентилятора достигается при оптимальном соотношении расходов воздуха, отдельно подаваемого к подсистемам вытяжки и завихрения потоков, равном 1,5:1.

Узел безлопастного вентилятора в сравнении с известными аналогами обеспечивает возможность настройки технических характеристик в зависимости от конкретных условий его применения, а также повышение обеспечиваемого насосного эффекта [2, 4–7].

Для проверки правильности принятых технических решений при разработке узла безлопастного вентилятора были проведены эмпирические исследования на его физической модели (рис. 3), выполненной в масштабе 1:48, направленные на фиксацию картин образования генерируемого им устойчивого вихря (рис. 4), а также распределение горизонтальной и вертикальной компонент скорости течения газозвушных потоков в нем с использованием тензометрического метода исследований (рис. 5, 6).

Эксперименты проводились с соблюдением геометрического и динамического подобия, что подтверждалось равенством критериев Ньютона, Фруда и Струхалья для натурального образца и его модели, при давлении в узле вентилятора, равном $P = 0,1$ МПа, площади щелей сегментов подсистем вытяжки и завихрения, соответственно составляющих $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ и $9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. При этом расход сжатого воздуха, подводимого к указанным подсистемам, составлял $Q_{исх}^{\uparrow} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{исх}^{\leftarrow} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Анализ полученных данных позволил сделать вывод о соответствии параметров полученного газозвдушного потока основ-

ным положениям теоретического описания комбинированного вихря, примыкающего к свободной поверхности (вихря Рэнкина).

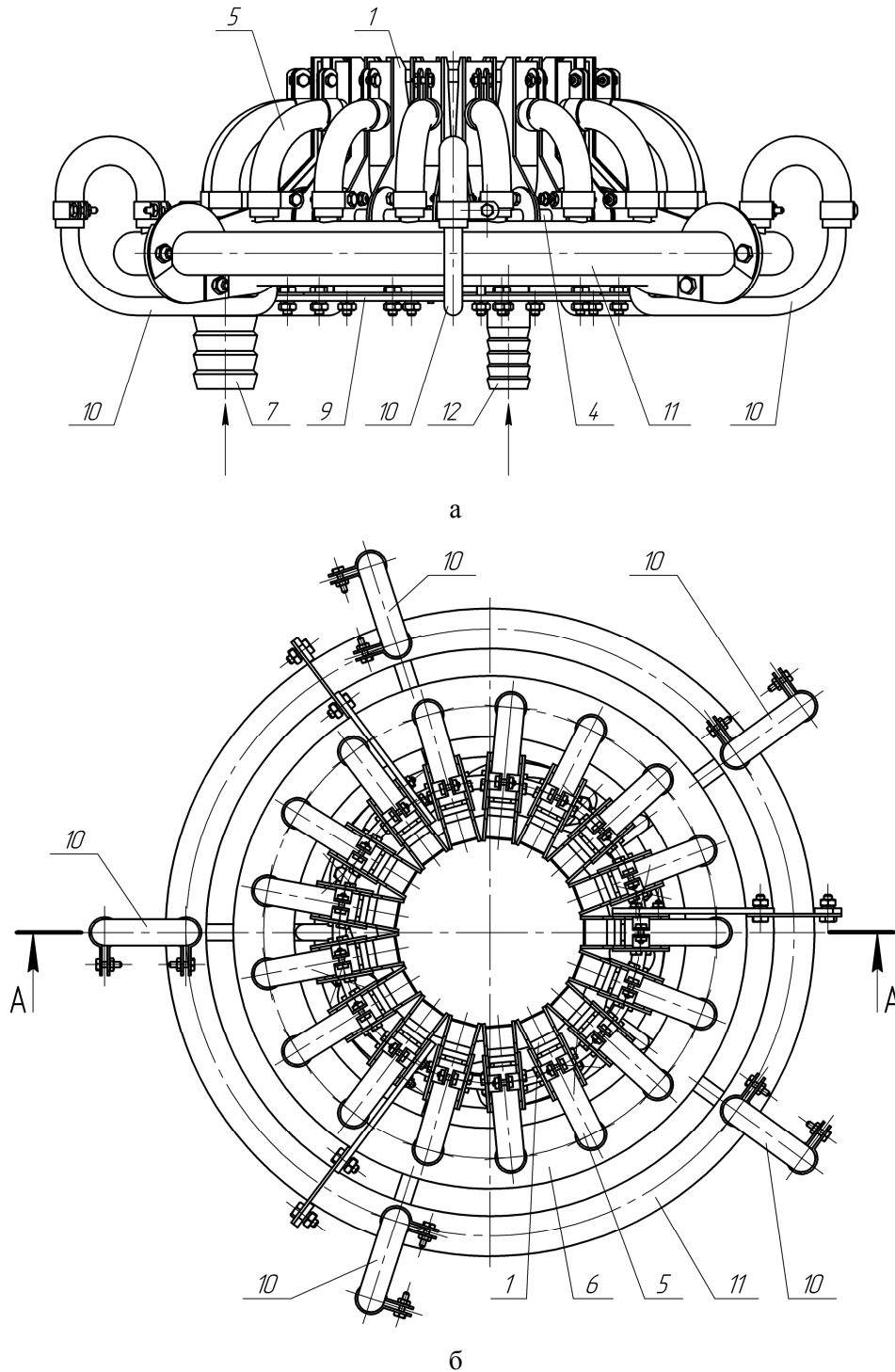


Рисунок 1 Узел безлопастного вентилятора: а — фронтальный вид; б — вид сверху

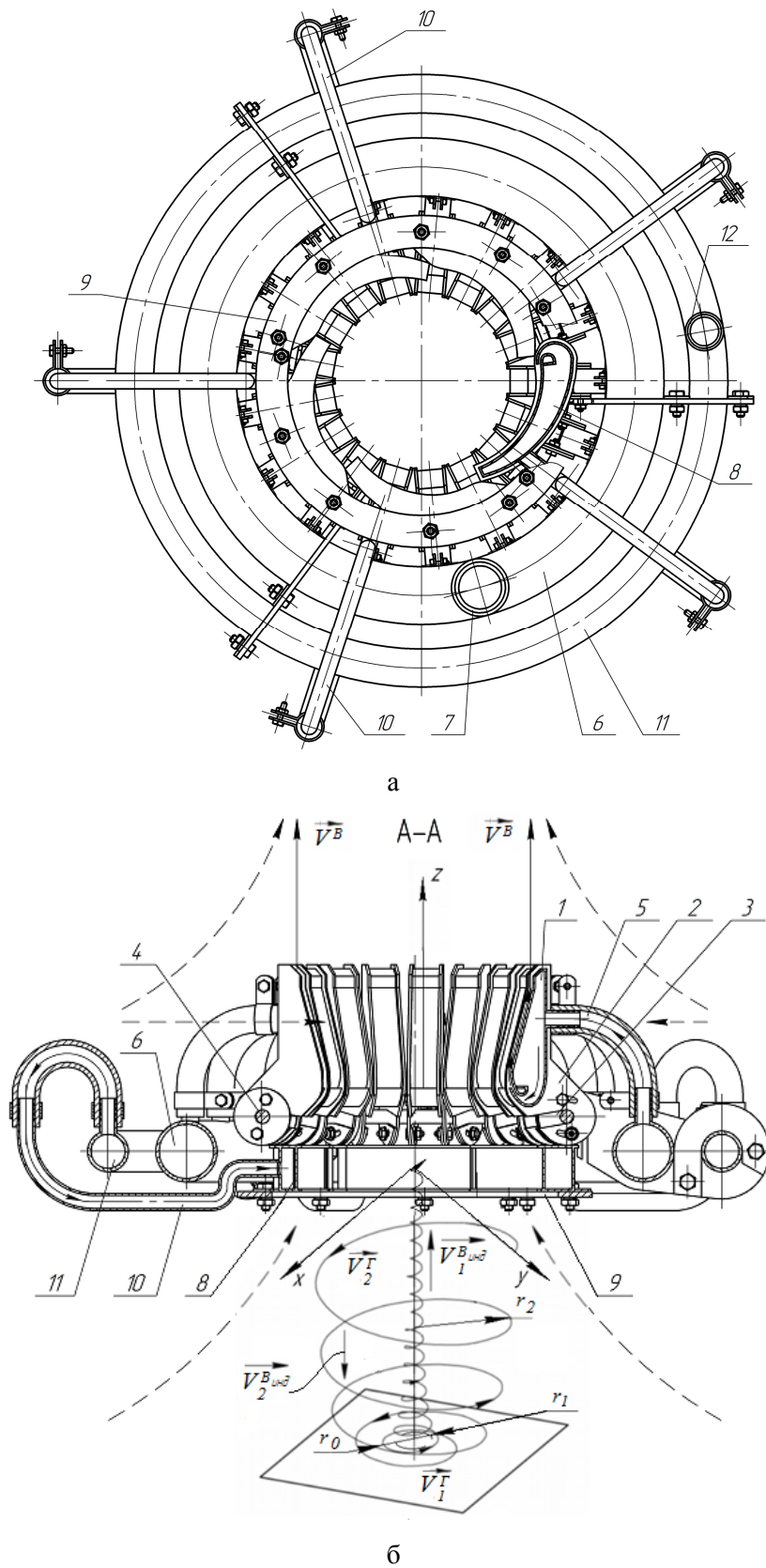


Рисунок 2 Узел безлопастного вентилятора: а — вид снизу; б — разрез А-А на рисунке 1, б со схемой распределения скоростей течения исходного и индуцированного газоздушных потоков

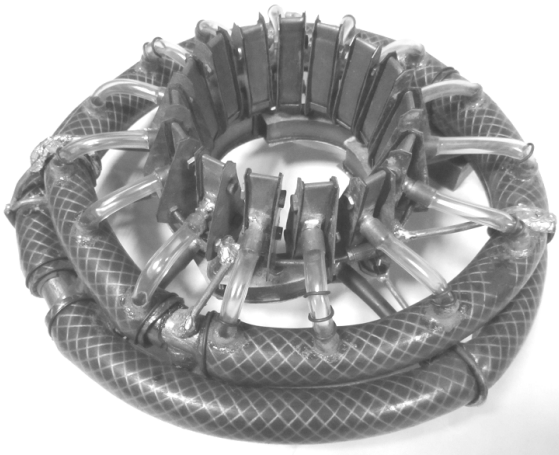


Рисунок 3 Физическая модель узла
безлопастного вентилятора

Линии тока в зоне работы узла представляют собой вложенные спирали (рис. 2). Двигаясь вниз (в сторону, противоположную положительному направлению вертикальной оси) по внешней спирали частица газа приближается к оси симметрии течения, при этом ее вертикальная и окружная компоненты поля скорости возрастают. Достигнув непроницаемой плоскости, частица переходит на внутреннюю спираль и начинает подниматься, удаляясь от плоскости, при этом ее вертикальная и окружная компоненты поля скорости убывают. Движение газоздушного потока является обратимым, в силу этого возможна противоположная картина движения. Направление закрутки потока также может быть произвольным в силу исходного допущения об осесимметричности движения.

Обоснование аэродинамических характеристик узла безлопастного вентилятора проводится при рассмотрении вихря как совокупности частиц, вращающихся по закону твердого тела с угловой скоростью ω [3]. Вне окружности r_0 (ядра вихря) завихренность равна нулю и вихрь называется свободным (при $r_1 < r_0$ вихрь называется вынужденным). Описание параметров вихря производится в соответствии с классическими положениями аэрогидромеханики с использованием теории Стокса (при опре-

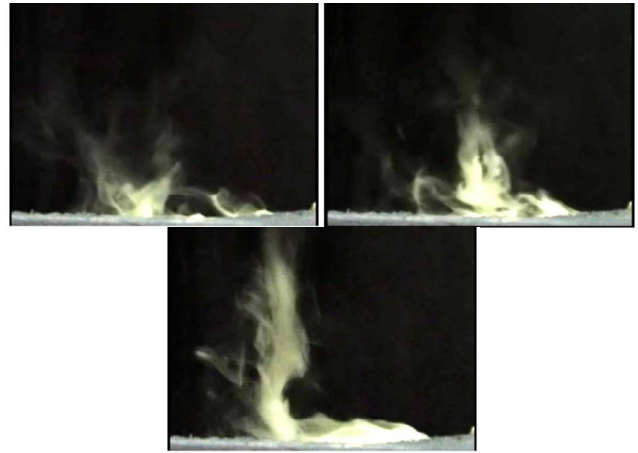


Рисунок 4 Характерные картины образования
устойчивого вихря, генерируемого узлом
безлопастного вентилятора

делении влияния вихря на окружающую среду), уравнений Эйлера (при установлении распределения значений давления внутри и вне его сечения), обобщенной формулы Био — Савара (для определения индуцируемой вихрем скорости).

При расчете распределения давления внутри и вне плоского вихря, генерируемого подсистемой завихрения узла (рис. 7), принимаются допущения, что он находится в первоначально невозмущенной среде. На границе ядра вихря при $r_i = r_0$ давление внутри равно давлению снаружи. При $r_i > r_0$ поток является потенциальным

$$V_i = \frac{\omega r_0^2}{r_i}, \quad (1)$$

$$p_i = -\frac{\rho \omega^2 r_0^4}{2r_i^2} + p_\infty, \quad (r_0 < r_i < \infty), \quad (2)$$

где V_i , p_i — значение скорости и давления соответственно на заданном от оси расстоянии r_i ; ρ — плотность газоздушной смеси; p_∞ — давление на бесконечности, принимаемое в расчетах равным атмосферному $p_\infty = p_{атм}$. Отсюда следует, что при приближении к вихрю (при уменьшении величины r_i) давление непрерывно убывает и всюду вне вихря меньше давления p_∞ в свободной окружающей среде.

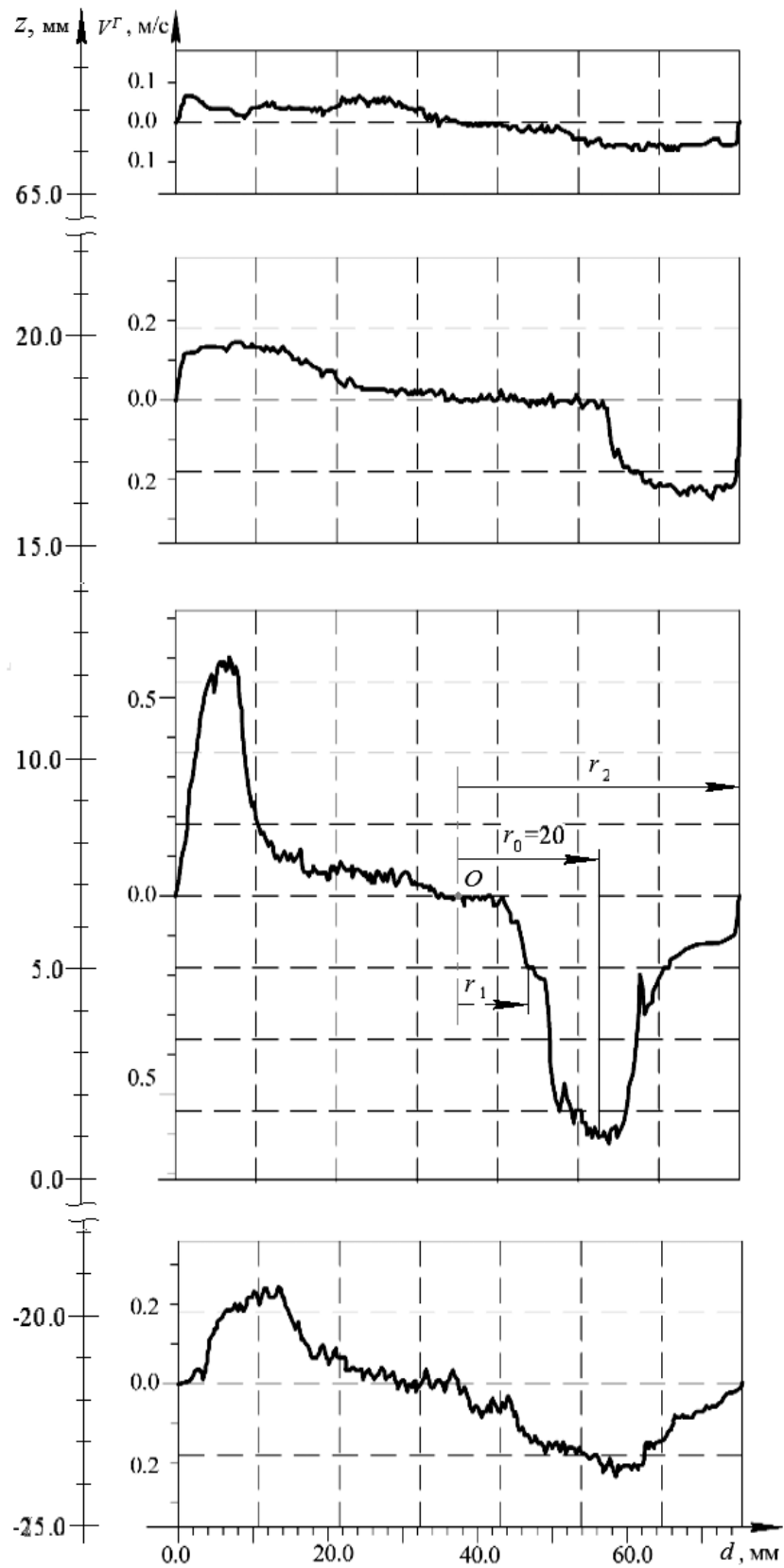


Рисунок 5 Распределение горизонтальной компоненты скорости течения газоздушных потоков в модели узла безлопастного вентилятора

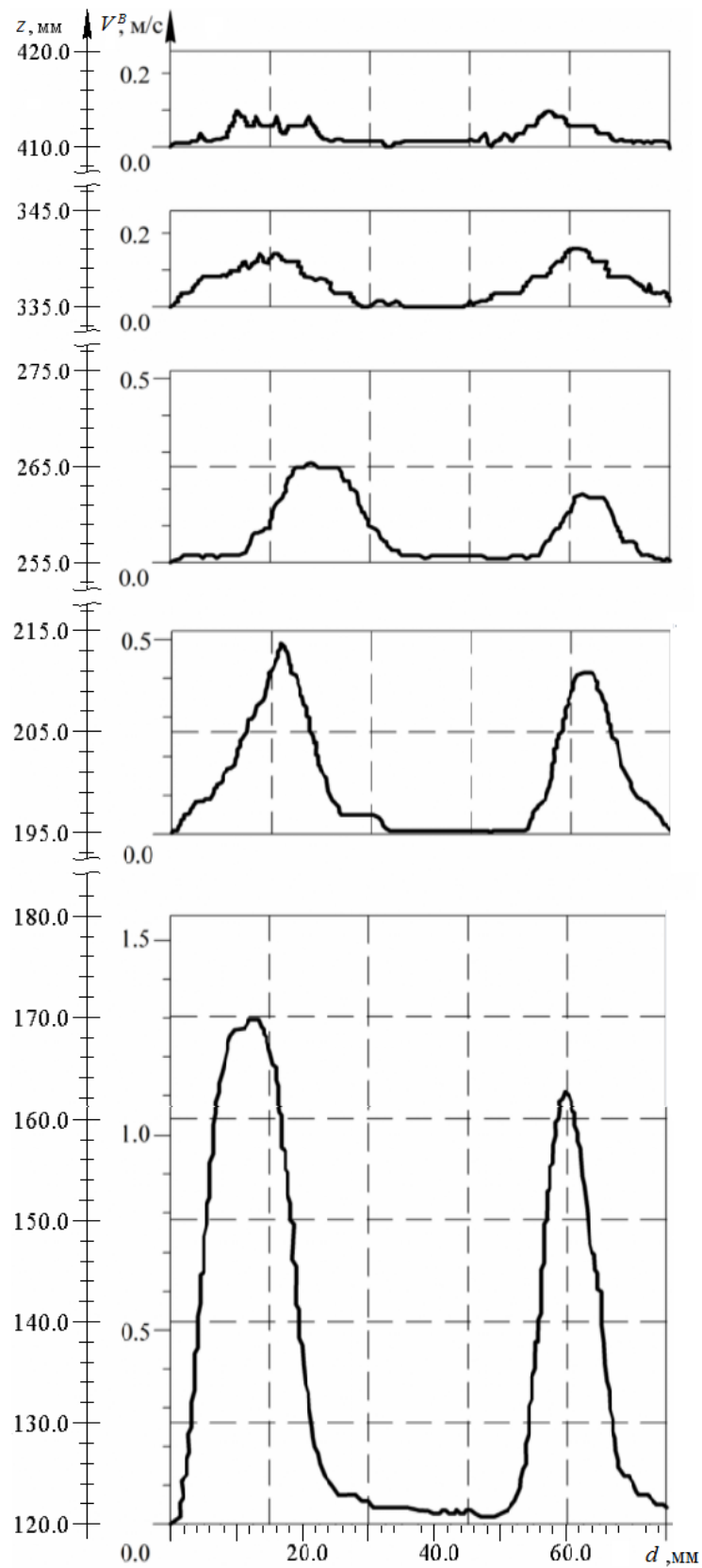


Рисунок 6 Распределение вертикальной компоненты скорости течения газозвудушных потоков в модели узла безлопастного вентилятора

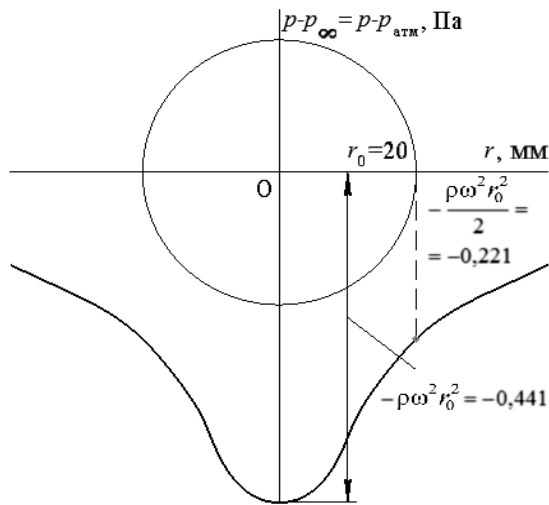


Рисунок 7 Распределение давления внутри и вне сечения цилиндрического вихря

При $r_i < r_0$ внутри ядра вихря поток непотенциальный. Изменение давления при этом описывается уравнением

$$p_i = \frac{\rho\omega^2}{2}(r_i^2 - 2r_0^2) + p_\infty. \quad (3)$$

Таким образом, в поле вихря давление убывает при приближении к оси, причем наиболее сильно — в его ядре.

Скорость, индуцируемая в вертикальной плоскости вихревым кольцом, имеющим радиус r_i , в соответствии с формулой Био — Савара, составляет

$$V_i^{B_{und}} = \frac{\Gamma_i r_i^2}{2(r_i^2 + z_i^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где Z_i — координата течения газовой воздушного потока; Γ_i — циркуляция вихря,

$$\Gamma_i = \frac{V_{li}^\Gamma 2\pi r_0^2}{r_i} \quad (\text{при } r_i < r_0); \quad (5)$$

$$\Gamma_i = V_{2i}^\Gamma 2\pi r_i \quad (\text{при } r_i > r_0). \quad (6)$$

Таким образом, при $r_i < r_0$

$$V_{li}^{B_{und}} = \frac{V_{li}^\Gamma 2\pi r_i^2 r_0^2}{2r_i \sqrt{(r_i^2 + z_i^2)^3}}, \quad (7)$$

при $r_i > r_0$

$$V_{2i}^{B_{und}} = \frac{V_{2i}^\Gamma 2\pi r_i^3}{2\sqrt{(r_i^2 + z_i^2)^3}}. \quad (8)$$

Результирующее значение скорости на уровне подсистемы завихрения узла определяется из выражения

$$\sum V_i^I = \sqrt{(V_i^{B_{und}})^2 + (V_i^\Gamma)^2}. \quad (9)$$

Расход газовой воздушной смеси в зоне индуцированного узлом вентилятора вихревого потока составляет

$$Q_i^I = S_i \sum V_i^I, \quad (10)$$

где S_i — площадь сечения узла, на котором действует значение $\sum V_i^I$.

Учет дополнительно инжектируемых в узел вентилятора за счет эффекта Коанда подсистемой вытяжки объемов Q^{II} учитывается так называемым умножающим эффектом k . Его значение варьируется от 6,5 при $P = 0,1$ МПа до 15 при $P = 0,7$ МПа. Таким образом,

$$Q^{II} = Q_{ucx}^\uparrow k. \quad (11)$$

Результирующее значение скорости $\sum V_i^{II}$ на выходе из подсистемы вытяжки узла вентилятора определяется с учетом скорости, индуцируемой вихревым кольцом $V_{li}^{B_{und}}$ при $z = 65 \cdot 10^{-3}$ м (для его физической модели), а также осредненного значения вертикальной компоненты скорости $\overline{V^B}$ воздушного потока, истекающего из соответствующих сегментов:

$$\sum V_i^{II} = \sqrt{\left(\overline{V^B}\right)^2 + (V_{li}^{B_{und}})^2}. \quad (12)$$

Значение динамического давления, генерируемого каждой из подсистем вентилятора, составляет

$$P_{дин}^j = \frac{\rho (\sum V_i^j)^2}{2}. \quad (13)$$

При обосновании энергосиловых параметров узла безлопастного вентилятора по вышеизложенной методике и использовании данных, полученных эмпирическим путем, необходимо применять масштабные множители линейных размеров ($a_l=48$) и скорости ($a_v=a_l^{0,5}=6,93$), значения которых получены в соответствии с критериями подобия [8].

Предлагаемая для расширения функциональных возможностей узла безлопастного вентилятора (увеличения рабочей зоны и повышения показателей его работы) конструкция системы эвакуации газопылевых выбросов (рис. 8) состоит из объединенных в одном корпусе 2-3-х узлов безлопастных вентиляторов 1, имеющих диаметр d и концентрически расположенных по окружности радиуса r_b .

В соответствии с положениями теории вихревого движения [3] и условием равной циркуляции потока в характерных точках представленной на рисунке 8 схемы, значение скорости сформированного в горизонтальной плоскости потока при $R_0 < R_i < r_e$ ($r_i < r_0$) составляет

$$V_{li}^{\Gamma} = \frac{V_{1i}^{\Gamma} r_0^2 R_i}{r_i R_0^2}, \quad (14)$$

а при $R_0 + 2r_0 < R_i < R_2$ ($r_i > r_0$)

$$V_{li}^{\Gamma} = \frac{V_{2i}^{\Gamma} r_i}{R_i} \rightarrow 0. \quad (15)$$

Максимальное значение эта величина принимает в точках A, B, C , где проходит граница ядра R_0 создаваемого узлами безлопастных вентиляторов вихря

$$V_{I \max}^{\Gamma} = \frac{V_1^{\Gamma} r_0}{R_0}, \quad (16)$$

$$R_0 = d - r_0 = r_e - r_0 = 3r_0, \quad (17)$$

при условии, что $r_e = d$.

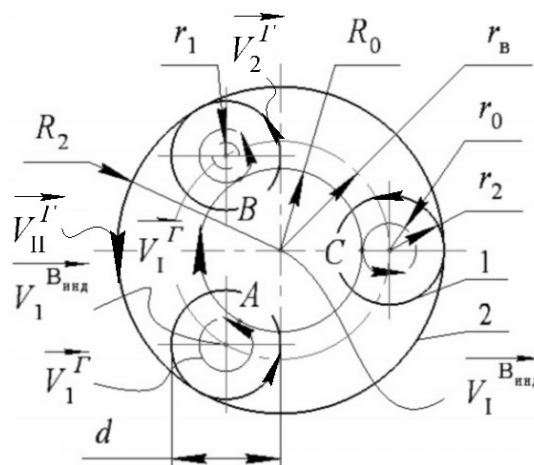


Рисунок 8 Схема к определению характеристик индуцированного системой устойчивого газоздушного потока

В соответствии с формулами (4), (7) и (16), скорость восходящего потока, индуцируемого при этом вихревым кольцом, имеющего радиус R_0 , в вертикальной плоскости

$$V_{li}^{B_{und}} = \frac{27\pi r_0^3 V_{I \max}^{\Gamma}}{\sqrt{(9r_0^2 + z_i^2)^3}}. \quad (18)$$

Суммарное значение скорости восходящего потока, его динамическое давление и обеспечиваемый центральной частью системы расход соответственно составляют

$$\sum V_{li} = \sqrt{(V_{li}^{B_{und}})^2 + (V_{I \max}^{\Gamma})^2}, \quad (19)$$

$$P_{I \text{дин}} = \frac{\rho (\sum V_{li})^2}{2}, \quad (20)$$

$$Q_I = 9\pi r_0^2 \overline{\sum V_I}, \quad (21)$$

где $\overline{\sum V_I}$ — осредненное значение скорости.

Таким образом, основные параметры системы эвакуации газопылевых выбросов, состоящей из 3-х узлов безлопастных вентиляторов, с учетом нисходящего и восходящего в вихре потоков определяются по следующим зависимостям

$$\sum V_{сист} = \sum V_i^{II} + \sum V_{Pi}, \quad (22)$$

$$P_{дин.сист} = P_{дин}^j + P_{Iдин}, \quad (23)$$

$$Q_{сист} = 3(Q_i^I + Q^{II}) + 2Q_I. \quad (24)$$

По разработанной методике были рассчитаны параметры опытно-промышленного образца системы эвакуации газопылевых выбросов, для обеспечения сжатым воздухом которой предусмотрены три центробежных турбогенератора серии TRX 180 со следующими характеристиками: мощность $N=1800$ кВт, обеспечиваемый расход $Q=5,55$ м³/с ($Q_{исх}^{\uparrow}=3,33$ м³/с и $Q_{исх}^{\leftarrow}=2,22$ м³/с), давление $P=0,69$ МПа [9]. Каждый из узлов безлопастных вентиляторов, имеющих диаметр горловины, образованной сегментами подсистемы вытяжки, равный 3,6 м, обеспечивает на выходе движение потока со скоростью 85 м/с, расходом 455 м³/с и динамическим давлением 2805 Па. При этом глубина рабочей зоны узла по оси z с учетом [6] составляет +70 м, а ее суммарный объем 2850 м³.

С учетом перечисленных выше значений параметров, в соответствии с выражениями (22–24), $\sum V_{сист} = 107$ м/с,

Библиографический список

1. Пат. 2630443 Российская Федерация, МПК F24F7/00, F04D25/00, F04D29/00. Узел безлопастного вентилятора для эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов / Е. Н. Смирнов, С. П. Еронько, М. Ю. Ткачѳв, В. А. Скляр, А. В. Сазонов, Б. И. Стародубцев, А. С. Сосонкин, О. И. Малахова ; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». — № 2016119782 ; заявл. 23.05.16 ; опубл. 07.09.17, Бюл. № 25. — 9 с. : ил.
2. Исследование на физической модели возможности использования принципа вентилятора Дайсона в системах газоотсоса металлургических агрегатов [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачѳв, А. С. Сосонкин и др. // *Металлургические процессы и оборудование*. — 2014. — № 2 (36). — С. 51–59.
3. *Аэрогидромеханика* [Текст] / Е. Н. Бондарев, В. Т. Дубасов, Ю. А. Рыжов и др. — М. : Машиностроение, 1993. — 608 с.
4. Ткачѳв, М. Ю. Использование энергии вихря для повышения эффективности работы вентиляционных устройств и систем [Текст] / М. Ю. Ткачѳв, Е. В. Ошовская // *Донбасс будущего глазами молодых ученых : материалы научно-технической конференции*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 94–98.

$P_{дин.сист} = 3135$ Па, $Q_{сист} = 2570$ м³/с, а глубина рабочей зоны составляет 6595 м³.

Таким образом, разработанная на основании достаточного объема эмпирических исследований методика расчета позволяет с минимальными временными затратами обосновать аэродинамические характеристики и энергосиловые параметры опытно-промышленного образца системы эвакуации газопылевых выбросов, состоящей из 3-х узлов безлопастных вентиляторов, в основе принципа действия которых лежат эффекты Коанда и торнадо, благодаря чему обеспечивается качественная эвакуация пылегазовых образований от источника их происхождения. При этом в соответствии с положениями теории вихревого движения впервые производится учет влияния скорости, индуцированной замкнутым вихревым кольцом, на характеристики генерируемого потока, взаимодействующего с источником пылегазовых образований.

Направлением дальнейших исследований следует считать изучение влияния масштабного фактора на эффективность работы системы в промышленных условиях.

5. Ткачѐв, М. Ю. Сопоставительные исследования эффективности функционирования узла безопасного вентилятора и сопла Лавалья [Текст] / М. Ю. Ткачѐв, М. Ю. Грищук // *Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие. В 6 т. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов : материалы VI международной научно-практической конференции.* — Донецк : ДонНТУ, 2020. — С. 20–24.

6. Разработка конструкции и модельные исследования новой вентиляторной системы проветривания карьеров [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачѐв, Е. Н. Смирнов и др. // *Черная металлургия : бюллетень научно-технической и экономической информации.* — 2018. — № 1. — С. 26–33.

7. Вараксин, А. Ю. Торнадо [Текст] : монография / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаши, В. Н. Копейцев. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 344 с.

8. Физическое моделирование технических систем [Текст] : учебное пособие / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. Ю. Ткачев [и др.]. — Донецк : ДонНТУ, 2020. — 259 с.

9. Каталог центробежных компрессоров предприятия DALGAKIRAN KOMPRESÖR [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dalgakiran.ru/product/centrobeznyj-kompressor-trx-180-turbokompressor>.

© Ткачѐв М. Ю.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ММ АДИ ДонНТУ Вовком Л. П., к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневым Д. А.

Статья поступила в редакцию 07.05.2021.

PhD in Engineering Tkachov M. Yu. (*Automobile and Road Institute of DonNTU, Gorlovka, DPR, mishel-tkachev@ya.ru*)

JUSTIFICATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF THE EVACUATION SYSTEM OF GAS-DUST EMISSIONS

The design scheme and method for calculating the energy-power parameters of evacuation system of gas and dust emissions from the sources of their formation, consisting of 3 sections of a bladeless fan which operating principle is based on the Coanda and tornado effects, is considered. The obtained dependences allow to determine the flow rates of the initial and induced by vortex rings of gas-air flows, the distribution of pressure inside and outside the section of the formed vortices, as well as the flow rates of the gas-air mixture provided by the system.

Key words: *bladeless fan, Coanda effect, Rankine vortex, theory of vortex motion, speed, pressure, flow rate.*