



**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛАВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК  
ШАХТ С ОСЕВЫМИ ВЕНТИЛЯТОРАМИ**

**И. В. Лугин**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ivlugin@misd.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Представлены результаты исследования влияния неоднородности поля скоростей воздушного потока, входящего в осевой вентилятор на аэродинамические параметры главных вентиляторных установок шахт для различных конфигураций входных элементов. Введен параметр для оценки неравномерности скорости воздуха на входе в вентилятор. Показано, что зависимость полного давления и полного КПД вентиляторной установки от неравномерности

*Главная вентиляторная установка, осевой вентилятор, аэродинамические параметры, неравномерность потока, входные элементы*

**INFLUENCE OF INPUT ELEMENT PARAMETERS ON AERODYNAMIC  
CHARACTERISTICS OF MAIN MINE FANS IN SHAFTS WITH AXIAL FANS**

**I. V. Lugin**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: ivlugin@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The results of studying the nonuniformity effect of air flow velocity field entering the axial fan on aerodynamic parameters of main mine fans of the shafts for different configurations of input elements are presented. A parameter for estimating air velocity nonuniformity at the fan input is introduced. It is shown that dependence of total pressure and total efficiency of the fan system is linear.

*Main mine fan, axial fan, aerodynamic parameters, flow nonuniformity, input elements*

Входные элементы являются необходимой частью шахтных вентиляторных установок и служат для создания такой конфигурации вентиляционного тракта, при которой двигатель вентилятора будет вынесен за пределы перемещаемого потока воздуха для соблюдения требований по пожаровзрывобезопасности. Наряду с этим входные элементы отрицательно влияют на аэродинамические параметры вентиляционной установки по двум причинам: дополнительного аэродинамического сопротивления и создания неравномерности поля скоростей воздушного потока на входе в вентилятор. По данным [1], потери давления в подводящих каналах составляют 7–30% от давления, развиваемого вентилятором. При этом современные входные коробки при малогабаритном исполнении имеют достаточно низкое сопротивление при работе в прямом режиме и значительное сопротивление в реверсивном режиме. Опубликованных результатов исследований по влиянию неравномерности входного потока на аэродинамические параметры шахтных вентиляторных установок в настоящее время нет, хотя, например, для авиационных двигателей такие исследования проведены достаточно полно [2]. Таким образом, тема исследований актуальна.

Одним из условий соответствия расчетных и эксплуатационных характеристик осевого вентилятора является равномерность скорости потока воздуха на входе в лопаточные колеса. Неравномерность поля скоростей на входе по модулю скорости или по направлению вектора приводит, как правило, к снижению аэродинамической характеристики относительно расчетной. При этом снижается производительность вентилятора при работе на расчетную шахтную вентиляционную сеть, что может вызвать недостаток количества подаваемого в горные выработки воздуха относительно требуемого.

Исследования по определению зависимости основных аэродинамических показателей (полное давление и полный КПД при различной производительности) вентиляторной установки от степени неравномерности потока воздуха в сечении на входе в рабочее колесо вентилятора выполнены на примере шахтного одноступенчатого вентилятора ВО-30 со втулочным отношением 0.6 (рис. 1).

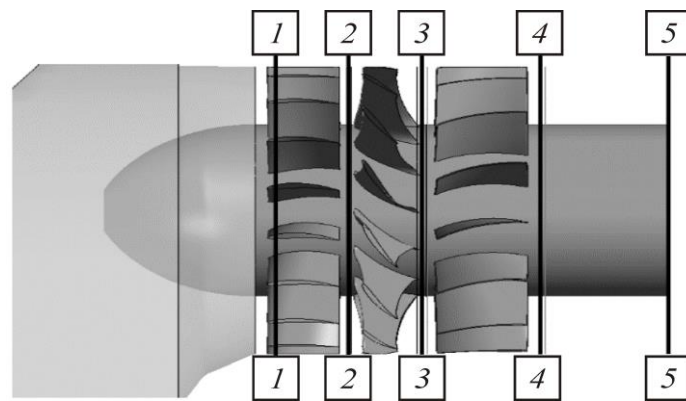


Рис. 1. Геометрическая модель проточной части вентилятора ВО-30 и номера расчетных сечений цилиндрического участка проточной части с указанием их расположения от начала участка: 1 — начало цилиндрической части, оно же вход в направляющий аппарат (0 м); 2 — вход в рабочее колесо (0.665 м); 3 — вход в спрямляющий аппарат (1.25 м); 4 — выход из спрямляющего аппарата (2.1 м); 5 — выход из вентилятора (3.0 м)

Аэродинамический расчет течения воздуха в вентиляционной установке осуществлен с применением вычислительного метода конечных объемов и его программной реализацией в модуле гидрогазодинамического расчета CFX программно-вычислительного комплекса ANSYS [3]. Трехмерная модель вентиляторной установки с одноступенчатым осевым вентилятором ВО-30 разработана на основе схемы ЦАГИ ОВ-84 [4] (рис. 1). Аэродинамическая схема “направляющий аппарат – рабочее колесо – спрямляющий аппарат” НА-К-СА имеет следующие параметры: втулочное отношение 0.6, направляющий аппарат С-32, 18 лопаток, угол установки лопаток (УУЛ)  $90^\circ$ , рабочее колесо К-84, 14 лопаток, УУЛ  $35^\circ$ , спрямляющий аппарат С-44, 15 лопаток, УУЛ  $78^\circ$ . Объемная геометрическая модель проточной части включает в себя вентилятор и входную коробку и разбита стандартными методами на дискретные элементы в виде структурированной сетки из гексаэдров. Размерность дискретной модели проточной части вентиляторной установки составила 5 088 158 ячеек и 5 551 218 узлов. Граничные условия: массовый расход воздуха на входе, статическое давление, равное атмосферному, на выходе. Рабочее тело — воздух плотностью  $1.2 \text{ кг/м}^3$ . Модель турбулентности — улучшенная  $k-\varepsilon$ , с масштабируемым пристеночным слоем, значение безразмерного параметра  $y^+$  находится в пределах рекомендаций для выбранной модели турбулентности. Расчет выполнен в стационарной постановке.

Неравномерность скорости воздушного потока на входе в лопаточную систему вентилятора обусловлена влиянием входных элементов вентиляторной установки, поэтому исследовано несколько вариантов компоновки входных элементов, показанных на рис. 2.

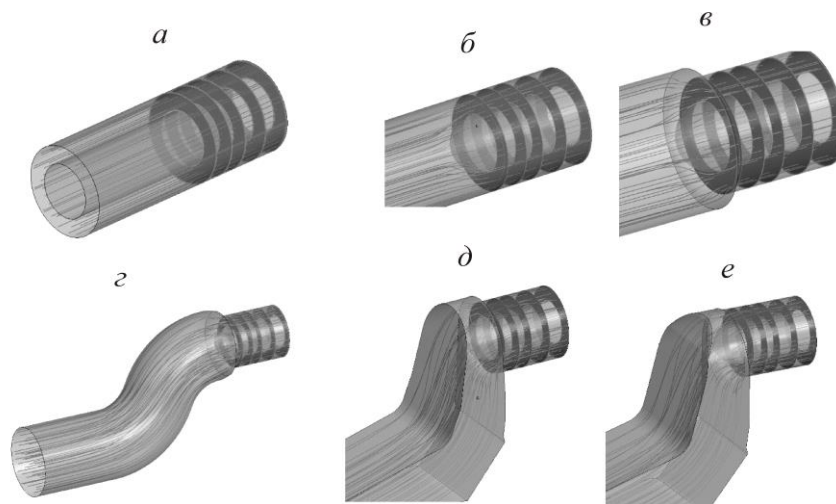


Рис. 2. Варианты компоновки входных элементов шахтной вентиляционной установки: *a* — прямой вход; *б* — прямой вход с коком; *в* — прямой вход с коком и коллектором; *г* — утка по И. В. Брусиловскому [4]; *д* — входная коробка по Г. А. Бабаку [1]; *е* — входная коробка, используемая в современных вентиляторных установках АМЗ “ВЕНТПРОМ” [5]

Неравномерность скорости воздушного потока оценивалась с помощью коэффициента неравномерности  $k_{IR}$ , представляющего собой разницу между отношением максимальной скорости  $V_{max}$  в сечении к средней скорости по площади  $V_{avr}$  этого сечения и единицей, представляющей собой абсолютно равномерное течение

$$k_{IR} = \frac{V_{max}}{V_{avr}} - 1,$$

т. е. коэффициент  $k_{IR}$  показывает, насколько течение в данном сечении отличается от полностью равномерного.

Результаты расчета неравномерности скорости потока воздуха приведены на рис. 3. Видно, что неравномерность значительно уменьшается на относительном расстоянии (расстояние, отнесенное к диаметру рабочего колеса) от начала цилиндрического участка проточной части, равном 0.22, — в данном вентиляторе это участок от входа в направляющий аппарат (сечение 1 (рис. 1)) до входа в рабочее колесо (сечение 2), далее снижение неравномерности носит монотонный характер, близкий к линейному. Поэтому рекомендуется располагать лопаточные колеса не менее такого расстояния от начала цилиндрической проточной части, чтобы снизить влияние неравномерности. Особенную важность эта рекомендация имеет при модернизации вентиляторов с переходом с двухступенчатой схемы на одноступенчатую [6, 7].

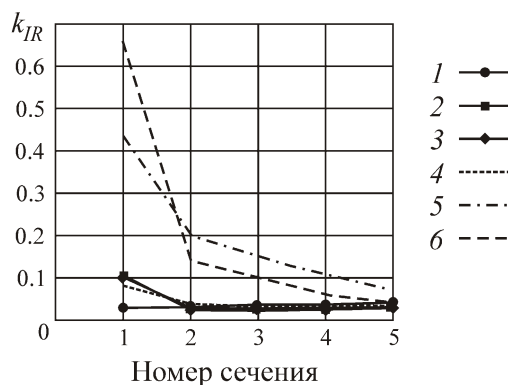


Рис. 3. Неравномерность  $k_{IR}$  скорости потока воздуха в расчетных сечениях проточной части вентилятора при различных вариантах компоновки входных элементов, показанных на рис. 2

Дальнейшие исследования показали, что увеличение длины цилиндрического участка на входе в вентилятор на определенное ранее относительное расстояние 0.22 на примере коробки АМЗ “ВЕНТПРОМ” дает повышение полного давления  $P_V$  на 1.1–7.6 % и полного КПД  $\eta$  на 0.5–6.1 %. В расчетной точке при производительности  $Q = 200 \text{ м}^3/\text{с}$  повышение  $P_V$  составляет 2.9 %,  $\eta$  — 1.7 %. Исследования проведены при УУЛ РК 35, рассмотрена область устойчивой работы вентилятора. Результаты расчета аэродинамических параметров вентилятора ВО-30 с различными входными элементами представлены на рис. 4.

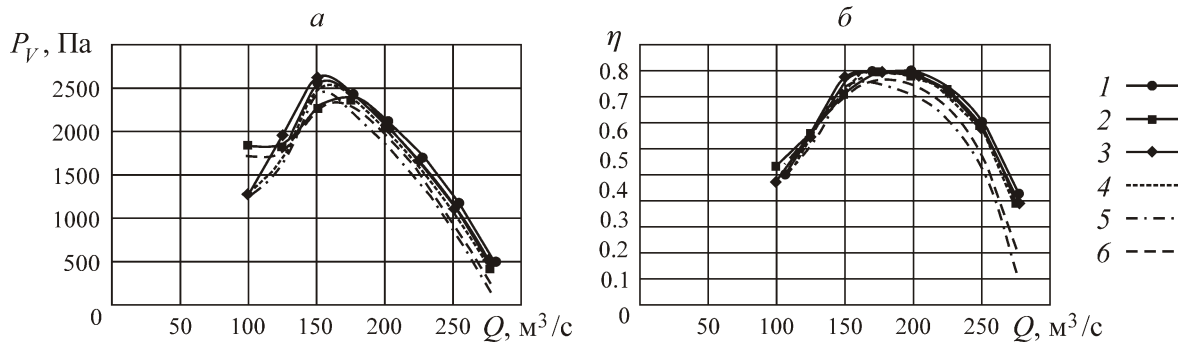


Рис. 4. Аэродинамические характеристики вентиляторной установки при различной конфигурации входных элементов (рис. 2): *а* — полное давление; *б* — полный КПД

Вариант 1 с прямым входом и равномерным потоком воздуха на входе принимается за базовый, варианты 4, 5 и 6 сравниваются с ним. Сравнение ведется при расчетном расходе  $200 \text{ м}^3/\text{с}$ , результаты представлены в таблице и на рис. 5. Видно, что зависимость аэродинамических параметров (полное давление и полный КПД) от неравномерности на входе в рабочее колесо (сечение № 2, рис. 1) носит линейный характер с величиной достоверности аппроксимации не менее 0.995. Негативное влияние неравномерности оценивается как снижение полного давления на величину от 1.5 до 13.4 %, полного КПД от 0.4 до 9 % в зависимости от варианта входного элемента. При неравномерности менее 0.1 снижение  $P_V$  менее 5.7 %,  $\eta$  — менее 3.6 %.

Влияние неравномерности воздушного потока на входе в вентилятор на его аэродинамические параметры

| Входной элемент    | Неравномерность воздушного потока в сечении |              | Аэродинамические параметры вентилятора |        | Изменение полного давления, % | Изменение полного КПД, % |
|--------------------|---|--------------|--|--------|-------------------------------|--------------------------|
|                    | № 1 (рис. 1)                                | № 2 (рис. 1) | $P_V$ , Па                             | $\eta$ |                               |                          |
| Вариант 1 (рис. 2) | 0.027                                       | 0.029        | 2140.1                                 | 0.888  | 0                             | 0                        |
| Вариант 4          | 0.080                                       | 0.037        | 2108.6                                 | 0.885  | -1.5                          | -0.4                     |
| Вариант 5          | 0.434                                       | 0.200        | 1853.5                                 | 0.808  | -13.4                         | -9.0                     |
| Вариант 6          | 0.655                                       | 0.143        | 1955.4                                 | 0.838  | -8.6                          | -5.6                     |

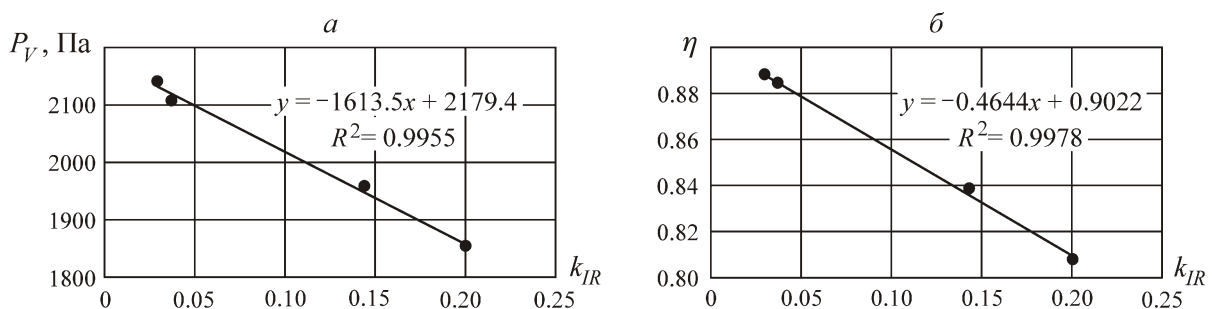


Рис. 5. Зависимость аэродинамических параметров главной вентиляторной установки от неравномерности на входе в рабочее колесо (сечение № 2, рис. 1) на примере шахтного одноступенчатого вентилятора ВО-30: *а* — полное давление, Па; *б* — полный КПД

## ВЫВОДЫ

Определена зависимость аэродинамических параметров вентиляторов (полное давление и полный КПД) шахтной главной вентиляторной установки с осевыми вентиляторами, имеющими втулочное отношение 0.6 от неравномерности скоростей воздушного потока в сечении воздушного тракта перед рабочим колесом вентилятора. Показано, что зависимости носят линейный характер с величиной достоверности аппроксимации не менее 0.995. Влияние неравномерности оценивается как снижение полного давления от 1.5 до 13.4 %, полного КПД от 0.4 до 9 % в зависимости от вида входного элемента. Производительность вентилятора при этом падает в соответствии с аэродинамической характеристикой сети. При коэффициенте неравномерности менее 0.1 снижение полного давления составляет менее 5.7 %, полного КПД — менее 3.6 %.

Установлено, что важнейшим геометрическим параметром, влияющим на неравномерность поля скоростей потока воздуха на входе в лопаточную систему вентилятора, является протяженность цилиндрического участка проточной части вентилятора от коллектора до лопаток. Основная часть неравномерности значительно уменьшается на относительном расстоянии 0.22 (расстояние, отнесенное к диаметру рабочего колеса) от начала цилиндрического участка проточной части осевого вентилятора, далее скорость снижения неравномерности существенно уменьшается и приобретает монотонный линейный характер. Рекомендуется располагать лопаточные решетки не менее такого расстояния от начала цилиндрического участка проточной части, чтобы снизить негативное влияние неравномерности на аэродинамические параметры вентиляционной установки. Использование этой рекомендации на примере осевого вентилятора ВО-30 с входной коробкой АМЗ дает повышение полного давления на 1.1–7.6 %, полного КПД на 0.5–6.1 % в пределах устойчивой области работы. В окрестностях расчетной точки аэродинамической характеристики вентилятора при производительности 200 м<sup>3</sup>/с повышение полного давления составляет 2.9 %, повышение полного КПД — 1.7 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Babak G. A., Levin E. M., and Pak V. V.** Elements of shaft ventilation installations of the main ventilation, Moscow, Nedra, 1972, 264 pp. [**Бабак Г. А., Левин Е. М., Пак В. В.** Элементы шахтных вентиляционных установок главного проветривания. — М.: Недра, 1972. — 264 с.]
2. **Ezrokhi Yu. A. and Khoreva E. A.** Application of mathematical modeling methods for assessing the influence of input flow inhomogeneity on the parameters and characteristics of an aviation gas turbine engine, Aerospace Scientific Journal, Moscow State Technical University, Electronic Journal, 2017, no. 03, pp. 1–19. [**Эзрохи Ю. А., Хорева Е. А.** Применение методов математического моделирования для оценки влияния неоднородности входного потока на параметры и характеристики авиационного ГТД // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ. Электрон. журн. 2017. — № 03. — С. 1–19.]
3. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide ANSYS CFX**, Canonsburg, 2014.
4. **Brusilovsky I. V.** Aerodynamic Configurations and Characteristics of TsAGI's, Axial Fans, Reference manual, Moscow, Nedra, 1978, 198 pp. (in Russian) [**Брусиловский И. В.** Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ / Справ. пособие. — М.: Недра. — 1978. — 198 с.]
5. **AVM JSC**, “Artemovskiy Machine-building plant “VENTPROM” <https://www.ventprom.com/products/item/avm>, accessed 03.05.2021 [**АВМ АО “Артемовский машиностроительный завод “ВЕНТПРОМ”** [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ventprom.com/products/item/avm>, свободный 03.05.2021.]
6. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., Kosykh P. V., and Russky E. Y.** Substantiation of life extension method for two-stage axial flow fans for main ventilation, Journal of Mining Science, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 478–493. [**Красюк А. М., Лугин И. В., Косых П. В., Русский Е. Ю.** Обоснование способа продления ресурса шахтных двухступенчатых осевых вентиляторов главного проветривания // ФТПРПИ. — 2019. — № 3. — С. 150–167.]

7. **Krasyuk A. M., Lugin I. V., and Kosykh P. V.** Modernization of two-stage main fans at the end of the service life, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 773 (2021) 012047.
8. **Krasyuk A. M. and Kosykh P. V.** Calculating bending vibrations of main axial mine fan rotor shaft, Journal of Mining Science, 2016, 52(3), pp. 502–510. [**Красюк А. М., Косых П. В.** К расчету изгибных колебаний вала ротора осевого вентилятора главного проветривания // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 80–89.]
9. **Kosykh P. V. and Krasyuk A. M.** Design model for bending vibrations of single-stage tunnel fan rotor, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 134(1), 012034.
10. **Krasyuk A. M. and Russky E. Y.** Optimizing design of blades for high-speed axial fans, Journal of Mining Science, 2020, 56(6), pp. 1024–1031. [**Красюк А. М., Русский Е. Ю.** К вопросу оптимального проектирования лопаток осевых вентиляторов с повышенными скоростями вращения // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 161–169.]