

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ МЕСТНЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ РУДНИКА ПРИ РЕВЕРСИВНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ

Станислав Александрович Павлов

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

В работе представлены результаты исследования влияния угла сопряжений выработок на изменение величины местных аэродинамических сопротивлений при разном направлении движения потока воздуха. С помощью программных комплексов, основанных на методе конечных объемов, были получены аэродинамические параметры элементов вентиляционной сети рудников и проведено их сравнение с аналитическими расчетами. Выявлено взаимовлияние местных аэродинамических сопротивлений, расположенных последовательно в вентиляционной сети, в нормальном и реверсивном режимах, что позволяет повысить точность расчета вентиляционных сетей шахт и рудников при аварийном режиме работы системы вентиляции.

Ключевые слова: реверсивный режим, рудник, местные аэродинамические сопротивления, стационарное воздушное распределение, рудничная вентиляция.

ESTIMATION OF AMOUNT CHANGING OF LOCAL AERODYNAMIC RESISTANCE OF ELEMENTS OF VENTILATION SYSTEM OF MINE AT REVERSING BEHAVIOR OF VENTILATION SYSTEM

Stanislav A. Pavlov

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: pavlov_s_a@inbox.ru

In the work study results of influence of typical working junction angle on amount changing of local aerodynamic resistances when air flows in different directions is represented. Using finite-element software, aerodynamic parameters of elements of mine ventilation network is obtained and is compared with analytical calculations. Interinfluence local aerodynamic resistances located at ventilation network consecutively in normal and reversing behavior is discovered. It allows to increase accuracy of calculation of mine ventilation network at emergency ventilation operation.

Key words: reversing behavior, mine, local aerodynamic resistances, stationary air distribution, mine ventilation.

Введение

Согласно Единых Правил Безопасности (п. 136) [1] главные вентиляторные установки должны обеспечивать реверсирование вентиляционной струи, поступающей в выработки. Расход воздуха, проходящего по главным выработкам в реверсивном режиме проветривания, должен составлять не менее 60 % от

расхода воздуха, проходящего по ним в нормальном режиме. Учитывая, что сопротивления трения воздуха о стенки выработок в нормальном и реверсивном режиме одинаковы, то снижение расхода воздуха при смене направления движения вентиляционной струи связано преимущественно с изменением аэродинамических параметров местных сопротивлений. При реверсировании потока воздуха величина местных аэродинамических сопротивлений, как правило, значительно изменяется.

В ряде работ отмечается [2, 3], что влияние местных сопротивлений в вентиляционных сетях шахт и рудников составляет около 20 %. Это объясняет тот факт, что при включении реверсивного режима работы вентилятора главного проветривания (ВГП) реальное воздухораспределение не выполняется и заметно отличается от полученного на основании теоретического расчета аэродинамических сопротивлений вентиляционной сети рудника.

В настоящее время в литературе существует ряд методов расчета местных аэродинамических (гидравлических) сопротивлений, которые позволяют точно рассчитывать перепады давлений для частных случаев изменения геометрических параметров одной выработки или сопряжений трех вентиляционных выработок (тройников) [4 – 6]. Существующие методы расчета вентиляционных сетей для нормального режима проветривания не позволяют корректно рассчитывать изменение воздухораспределения при переходе на реверсивный режим [7]. Таким образом, исследования закономерностей воздухораспределения в вентиляционных сетях шахт и рудников при реверсировании ВГП являются актуальными.

Методы и материалы

Как отмечалось выше, в настоящее время существуют методы расчета местных аэродинамических сопротивлений только конкретных элементов. На практике, в рудниках такие конкретизированные сопряжения выработок встречаются редко, чаще они располагаются группами последовательно или параллельно. Поэтому в расчетах вентиляционных сетей принимаются значения аэродинамического сопротивления для отдельных элементов, а для всей сети принимается допущение в 10-15%. Проводимые в последствие воздушно-депресссионные съемки подтверждают правильность таких допущений. Однако, при включении реверсивного режима работы вентиляции, зачастую, наблюдаются значительные отклонения от расчетных значений и для выполнения требований ПБ [1] по необходимому воздухораспределению применяют устройства отрицательного регулирования в вентсети. Выявление участков с изменившейся величиной местного аэродинамического сопротивления при реверсировании потока воздуха вызывает затруднения в натуральных условиях действующего предприятия. Поэтому для выявления общих закономерностей воздухораспределения при реверсивном режиме работы вентиляции необходимо разработать и исследовать численные модели элементов вентиляционной сети рудника.

В настоящее время существует ряд сертифицированных расчетных комплексов (FLOW3D, FLUENT, ANSYS CFX), которые основаны на численном решении уравнений перемещения жидкости или газа [8-12]. Получить аэродинамические параметры элементов вентиляционной сети рудников возможно в программах вычислительной гидродинамики, в частности ANSYS CFX. Расчеты сводятся к численному решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений газодинамики Навье-Стокса.

Другой программный комплекс SolidWorks относится к пакетам 3D моделирования среднего уровня. Прикладной модуль гидродинамического моделирования SolidWorks Flow Simulation сочетает высокоуровневую функциональность с точностью и простотой пользования. Программный пакет позволяет решать целый комплекс задач, в том числе внутренние и внешние задачи аэромеханики, используя при этом математическую модель Навье-Стокса [8-10]. SolidWorks Flow Simulation основан на методе конечных объемов решения уравнений газодинамики таких как, уравнение неразрывности, уравнение сохранения энергии и уравнение количества движения. Одним из важных свойств метода конечных объемов является то, что в нем заложено точное интегральное сохранение таких величин, как масса, количество движения и энергии на любой группе контрольных объемов, а, следовательно, и на всей расчетной области [13, 14]. При расчете стационарных вариантов процесс итерации по времени завершается при достижении уровня сходимости, определенного пользователем. Определения аэродинамических характеристик моделей элементов вентиляционных сетей при помощи программы SolidWorks Flow Simulation во многом является альтернативой существующим методам определения аэродинамических характеристик выработок, согласно которым испытания их моделей проводятся на лабораторных стендах, в аэродинамических трубах или в натурных условиях действующих горнодобывающих предприятий. С помощью упомянутого программного комплекса были проведены численные эксперименты по «продувке» элементов вентиляционной сети рудника, представляющих собой местные аэродинамические сопротивления.

Результаты

Рассмотрим элемент вентиляционной сети, содержащий поворот выработки с заданным углом, для примера возьмем 60° и 120° (рис. 1, а, б). Наиболее часто такие выработки можно встретить в околоствольных дворах, на транспортных уклонах, в сбойках и въездах в технологические камеры на рудниках.

Аналитический расчет на основании методики [6], позволяет без труда определить аэродинамические сопротивления данных элементов. Для первого (рис. 1, а) и второго варианта (рис. 1, б) местные сопротивления (с учетом сопротивления трения о стенки) как в нормальном, так и реверсивном режимах составят $0,009878 \text{ км}$ и $0,003422 \text{ км}$ соответственно.

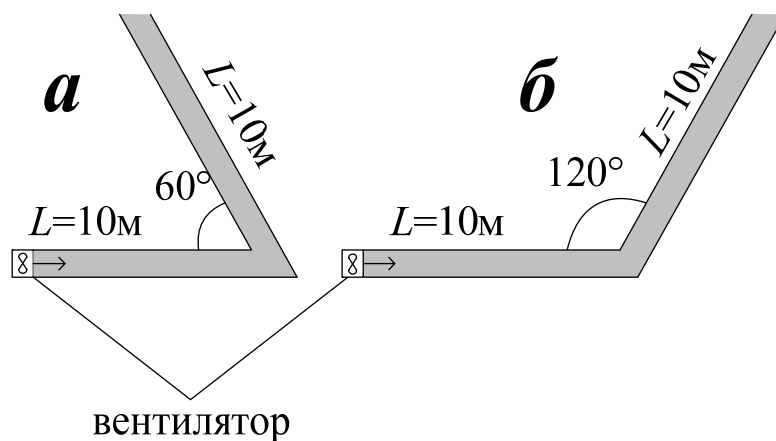


Рис. 1. Схема элементов вентиляционной сети

Рассмотрим «продувку» этих выработок при помощи программного комплекса SolidWorks Flow Simulation. Шероховатость стенок принималась, как и в аналитическом расчете – 0,01 м. Расчетная сетка в проточной части модели составила около 220000 ячеек. Геометрические параметры выработок и углы поворотов соответствует рис. 1.

Полное аэродинамическое сопротивление рассматриваемых выработок при этом составило 0,009939 $k\mu$ и 0,003403 $k\mu$. Отличие от значения, полученного аналитическим путем, составило 0,6 %. Данное сравнение показывает, что расчет с помощью программного комплекса методом конечных объемов адекватно моделирует отдельные элементы вентиляционной сети, что позволяет доверительно относиться к полученным результатам и, выведенным на их основании, зависимостям.

Объединим выработки между собой последовательно для выявления взаимного влияния двух местных сопротивлений, в зависимости от направления движения воздушной струи (рис. 2).

На основании аналитического расчета, аэродинамическое сопротивление получившейся выработки, как в нормальном режиме, так и в реверсивном составит 0,013299 $k\mu$.

В результате расчета в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation, аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка, при нагнетании воздуха через выработку рис. 2, а, в нормальном режиме составило 0,012232 $k\mu$, а в реверсивном – 0,011532 $k\mu$, отличие от рассчитанного аналитическим способом составило 8,0 % и 13,3 %, соответственно. При нагнетании воздуха со стороны выработки (рис. 2, б) в нормальном режиме составило - 0,011595 $k\mu$, а в реверсе - 0,012169 $k\mu$, что на 12,8 % и 8,5 % соответственно отличается от аналитического расчета местного сопротивления рассматриваемого участка.

Рассмотрим вариант двух независимых друг от друга выработок, имеющих несколько местных сопротивлений, чередующихся в разной последовательно-

сти (рис. 3). В прямом и реверсивном режимах, как для первой (рис. 3, а), так и для другой выработки (рис. 3, б) суммарные аэродинамические сопротивления будут одинаковы и составят $0,025221 \text{ к}\mu$ для каждой. Соответственно, любая программа статического воздухораспределения, находящаяся в пользовании у горнодобывающего предприятия, покажет одинаковый расход воздуха в прямом и реверсивном режиме, при условии одинаковых напорных характеристик вентилятора.

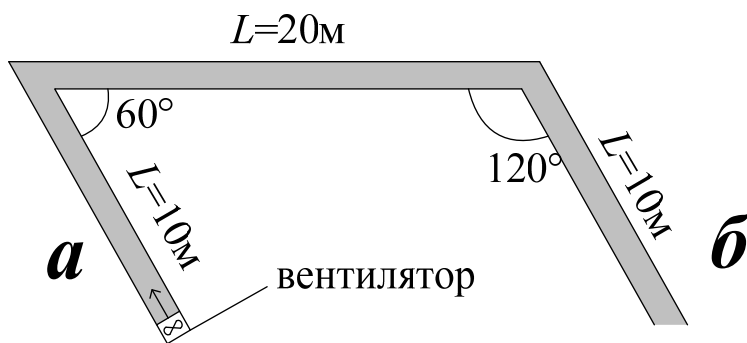


Рис. 2. Схема элементов вентиляционной сети

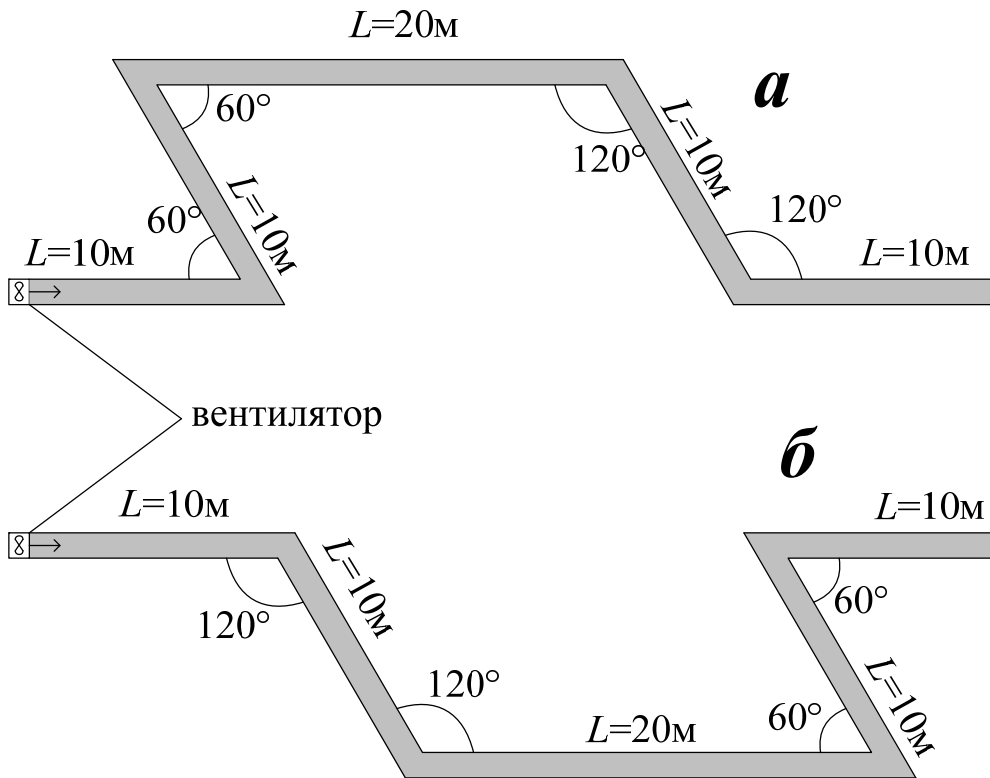


Рис. 3. Схема элементов вентиляционной сети

Рассмотрим решение воздухораспределения для этих же выработок при помощи программного комплекса SolidWorks Flow Simulation. Расчетная сетка в проточной части модели составила около 940000 ячеек. Геометрические параметры выработок и углы поворотов соответствует рис. 3.

В результате расчета выяснилось, что в нормальном режиме работы вентиляции суммарное аэродинамическое сопротивление первой выработки (рис. 3, *а*) составит $0,025866 \text{ к}\mu$, для второй (рис. 3, *б*) – $0,029243 \text{ к}\mu$. Полученные значения больше рассчитанного аналитическим способом на 2,5 % и 13,8 % соответственно.

При реверсировании потока воздушной струи изменение аэродинамического сопротивления этих выработок составит: для первой – $0,027650 \text{ к}\mu$, а для второй – $0,026249 \text{ к}\mu$. Полученные значения больше рассчитанного аналитическим способом на 8,8 % и 3,9 % соответственно.

Объединим рассмотренные выше выработки в одну сеть (рис. 4). В данном случае появляется еще одна разновидность местных сопротивлений – разделение и слияние потоков в местах сопряжения выработок. Кроме того, в новой модели вентиляционной сети появился участок с параллельными выработками (рис. 4, *а, б*), снижающие общее суммарное аэродинамическое сопротивление, рассматриваемого участка, которое в итоге составило $0,011445 \text{ к}\mu$.

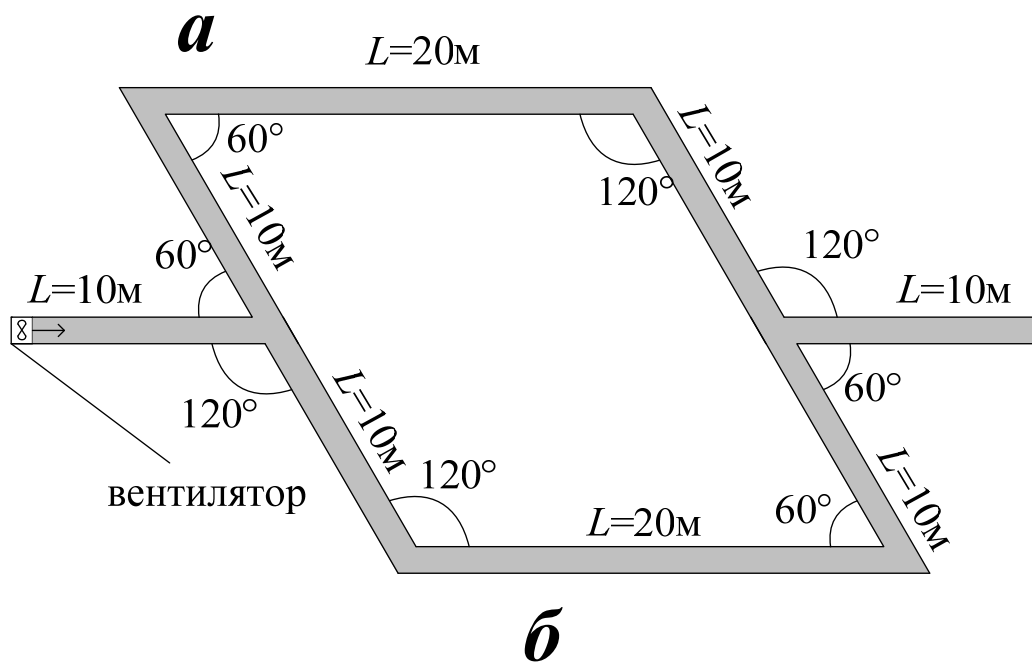


Рис. 4. Схема элементов вентиляционной сети

Рассчитанное аналитическим путем аэродинамическое сопротивление параллельных участков получилось равным по величине. Поэтому расчет расхода воздуха в программах статического воздухораспределения через них получается равным по значению.

В программном комплексе SolidWorks Flow Simulation разделение потока получилось неравномерным. Для верхнего вентиляционного тракта (рис. 4, а) аэродинамическое сопротивление составило $0,066541 \text{ км}$, для нижнего (рис. 4, б) - $0,048285 \text{ км}$. Общее суммарное аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка составило $0,014080 \text{ км}$, что на 18,7 % больше рассчитанного аналитическим способом.

При реверсировании потока, общее суммарное аэродинамическое сопротивление составило $0,013252 \text{ км}$, что на 13,6 % больше рассчитанного аналитическим способом.

Заключение

Как показал проведенный анализ исследования лишь небольшого участка вентиляционной сети рудника, что используемые на протяжении десятилетий методики расчета гидравлических сопротивлений достаточно точно определяют аэродинамические сопротивления отдельных элементов, но не учитывают их взаимное влияние. Поэтому аналитический расчет аэродинамических параметров вентиляционных сетей горнодобывающих предприятий нужно корректировать, прибегая к помощи программных комплексов, основанных на методе конечных объемов.

При реверсировании потока воздуха изменение аэродинамического сопротивления отдельно взятого элемента вентиляционной сети несущественно. Но учитывая, что таких элементов в вентиляционной сети подземного горнодобывающего предприятия может быть более сотни, то их суммарное влияние на воздухораспределение значительно возрастает. В связи с этим, возникает необходимость разработать методы расчета аэродинамических параметров вентиляционных сетей, учитывающих взаимное влияние элементов как в нормальном, так и реверсивном режиме проветривания, позволяющие выполнить расчет с большей точностью, чем это было раньше.

Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117091320027-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ПБ 03-553–03. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. Серия 03. Выпуск 33 / Колл. авт. – М.: Научно-технический центр «Промышленная безопасность», 2009. – 200 с.
2. Алыменко Н.И. О выборе рациональных аэродинамических параметров вентиляционных каналов главной вентиляторной установки / Н.И. Алыменко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 93–102.
3. Казаков Б.П. Структурно-классификационный анализ рудничных вентиляционных сетей по типам протекающих в них аэрологических процессов / Б.П. Казаков // Сборник докладов ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН. – 2009. – С. 192–194.

4. Мохирев Н. Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н. Н. Мохирев, В. В. Радько. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. — 324 с.
5. Харев А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей / А.А. Харев. — М.: Углетехиздат, 1954. —248 с.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. –672 с.: ил.
7. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д-ра техн. наук. - Пермь, 2012. - С. 32-45.
8. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation: моногр. – М. ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
9. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи: учеб. – СПб. БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
10. SolidWorks - мировой стандарт автоматизированного проектирования [Электронный ресурс] - <http://www.solidworks.ru/products/> - дата обращения 15 ноября 2018 г.
11. Федорова Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс, 2017. -210 с
12. Электронное пособие ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.
13. Хлопков Ю.И. Лекции по теоретическим методам исследования турбулентности: учебное пособие /Ю. И. Хлопков, В. А. Жаров, С. Л. Горелов. – М.: МФТИ, 2005. – 179 с.
14. Фрик П. Г. Турбулентность: модели и подходы: курс лекций: 4.1 / П. Г. Фрик. – Пермь: ПГТУ, 1998. – 108 с.

© С. А. Павлов, 2019