

УДК 622.457.2

**УЛУЧШЕНИЕ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ  
ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУХА  
В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СТРУЕ**

**Б. П. Казаков, А. В. Шалимов, О. С. Паршаков, А. В. Богомятков**

*Горный институт УрО РАН,*

*E-mail: shalimovav@mail.ru, ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Проведен обзор экспериментальных данных по определению дальнобойности стесненных вентиляционных струй, направленных в тупик. Показано, что результаты исследований в этой области сильно различаются и не позволяют осуществлять однозначный прогноз допустимого отставания воздухопровода от груди забоя с приемлемой для практических целей точностью. Сделано предположение, что причиной расхождений экспериментальных данных является эмпирическая концепция независимости дальнобойности стесненной тупиковой струи от ее начальной скорости, строгие доказательства которой отсутствуют. Гипотеза подтверждена результатами численного моделирования процесса проветривания тупиковой выработки струей воздуха с визуализацией замыкания потока при скоростях движения воздуха не менее 0.25 м/с. С ростом дебета вентилятора расстояние замыкания возрастает и изменение начальной скорости струи с 5 до 80 м/с увеличивает ее дальнобойность до 56 м. По результатам проведенных исследований сделан вывод, что к эффективным ресурсосберегающим решениям при проветривании тупиковых выработок следует отнести увеличение подачи воздуха в воздухопровод, позволяющее увеличить расстояние от груди забоя на безопасное для проведения буровзрывных работ расстояние.

*Тупиковый забой, воздушная струя, турбулентность, диффузия, циркуляция, дальнобойность, вентиляционный трубопровод, эффект Коанда, степень стеснения струи*

DOI: 10.15372/FTPRPI20220112

Проветривание тупиковых забоев при проходке горных выработок осуществляется за счет совместного действия вентиляторов главного и местного проветривания. По правилам безопасности, тупиковые выработки протяженностью до 10 м, а для угольных шахт до 6 м без ведения горных работ могут проветриваться за счет диффузии без использования дополнительных источников тяги [1, 2]. С прохождением потока воздуха через примыкающую сквозную выработку в результате турбулентного перемешивания возникает циркуляция воздуха, достигающая стенки тупика, находящейся на небольшом расстоянии. При большей длине выработки циркуляция стенки не достигает, образуется застойная непрветриваемая зона [3], и правилами безопасности предписывается принудительная подача воздуха в забой по трубопроводу с по-

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596021 п\_НОЦ\_Пермский край.

мощью сжатого воздуха или вентилятора местного проветривания (ВМП), забирающего часть воздуха примыкающей выработки. Причем его производительность не должна превышать 70 % количества воздуха, подаваемого к его входу за счет общешахтной депрессии. Устанавливаться он должен на удалении не менее 10 м от выхода исходящей струи, а расстояние от конца нагнетательного трубопровода до забоя или до пульта управления комбайном не должно превышать 5 – 12 м в зависимости от газообильности шахты [1, 2].

Указанные требования представляются необоснованно жесткими в связи со следующей аргументацией. Требование удаленной установки ВМП и забора менее 70 % воздуха преследует цель недопущения попадания на вход вентилятора части исходящей струи. Таким образом накладываются ограничения на дебит используемых источников тяги как снизу по требуемому количеству воздуха для проветривания забоя, так и сверху — не более 70 % всего расхода, что может оказаться труднореализуемым на практике с помощью типовых ВМП. На деле верхнее ограничение является излишним, поскольку возникающая частичная рециркуляция воздуха при использовании ВМП избыточной производительности нисколько не ухудшает проветривание забоя, а также не уменьшает количество свежего воздуха,двигающегося дальше по сквозной выработке [4]. Необоснованным представляется также равенство длины тупиковой выработки, проветриваемой за счет диффузии, и предельно допустимого расстояния конца вентиляционного трубопровода от груди забоя при принудительном проветривании. Очевидно, что направленная в тупик струя будет иметь значительно больший эффект по дальности проветривания, чем касательное движение струи с диффузионным захватом воздуха из тупиковой полости, что подтверждается результатами численного моделирования проветривания забоев после проведения буровзрывных работ [5, 6]. На интенсивность проветривания тупиковых выработок оказывают влияние также сопротивления их сопряжений с воздухоподающими выработками, исследованные в [7], и наличие источников выделения тепла, которые инициируют адвективное движение воздуха, результаты аналитического моделирования которого представлены в [8].

#### **АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

Опыты, выполненные В. Н. Розенбергом [9] по исследованию струи, поданной в ограниченное пространство, показали, что практически полное затухание осевой скорости струи, бьющей в тупик, происходит на расстоянии 3–4 диаметров трубы, имитирующей помещение, причем увеличение начальной скорости струи не приводит к увеличению ее дальнобойности. Экспериментальные исследования направленных в тупик воздушных струй проводились также другими учеными в широком диапазоне параметров стеснения [10–17].

Согласно анализу физической картины взаимодействия встречных потоков воздуха, на дальнобойность струи основное влияние оказывает характер ее стеснения и эффект Коанда для настилающихся струй [10, 11], а остальные факторы, в том числе скорость истечения потока, влияют в значительно меньшей степени. При прочих равных условиях функция изменения дальнобойности струи от стеснения имеет экстремум, так как и малое (ограниченные струи) и большое (свободные струи) стеснение снижают дальнобойность. Закономерный результат этих исследований — большое количество экспериментальных зависимостей [18], связывающих поперечные размеры выработки и струи с ее дальнобойностью при полном пренебрежении более слабым влиянием на нее начальной кинетической энергии воздушного потока (табл. 1), позволяющим рассчитать оптимальный коэффициент стеснения струи для достижения максимальной дальности проветривания тупика. На практике высота выработки не является варьируемым параметром и проводить оптимизацию проветривания по этим формулам можно лишь за

счет изменения выходного сечения струи. Учитывая, что дальнобойность струи принято определять по снижению скорости движения воздуха до 0.25 м/с [19], допущение независимости дальнобойности от его начальной скорости представляется некорректным уже хотя бы потому, что при ее постепенном снижении до нуля дальнобойность должна стать нулевой независимо от степени стеснения струи.

ТАБЛИЦА 1. Эмпирические зависимости для расчета дальнобойности направленной в тупик струи воздуха по данным различных авторов

№ п/п	Формула для определения дальнобойности струи $L$ , м	Исследованный диапазон стеснения струи $n$	Автор
1	$(4.15 - 6.88)\sqrt{S}$	8.06 – 17.96	Батурин В. В.
2	$4.76\sqrt{S}$	4.77 – 75.50	Абрамович Г. Н.
3	$\frac{D-d}{2} \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right)$	5.00 – 12.00	Бодягин М. Н.
4	$(3.4 - 5.0)\bar{D}$	5.00 – 10.00	Паршин Я. Д.
5	$0.5\frac{S}{\alpha P} + 0.6\frac{S}{d}$	3.00 – 14.00	Мостепанов Ю. Б.
6	$7d + 4.1\bar{D}$	2.50 – 20.00	Вассерман А. Д.
7	$6.2\bar{D}$	2.50 – 50.00	Талиев В. Н.
8	$(3.38 - 4.51)\sqrt{S}$	3.10 – 30.90	Розенберг В. Н.
9	$4\sqrt{S}$	4.50 – 40.00	Игнатенко К. П.

Примечание:  $S$  — сечение выработки, м<sup>2</sup>;  $d$  — начальный диаметр струи, м;  $P$  — периметр выработки, м;  $D$  — диаметр выработки, м;  $\bar{D} = 4S / P$  — приведенный диаметр выработки, м;  $\alpha = 0.076$  — коэффициент структуры струи,  $n = \bar{D} / d$  — параметр стеснения струи

Г. Н. Абрамович [9], сравнивая результаты теоретического моделирования распространения стесненной струи с экспериментальными данными В. Н. Розенберга, отметил, что удовлетворительное совпадение наблюдалось только на участке раскрытия струи до начала ее затухания в результате постепенного перемешивания со встречным потоком воздуха длиной ~ 3.5 поперечного размера выработки.

Расчетное значение скорости движения воздуха вдвое превышало полученное в эксперименте, что интерпретировано автором как “несовершенство второго участка (участка затухания) течения в осесимметричном тупике” [13]. Попыток привести теоретическую модель затухания струи в соответствие с опытными данными не последовало, вероятно, потому, что смоделировать независимость длины участка перемешивания встречных потоков воздуха от их скорости не представляется возможным с физической точки зрения. Очевидно, такая зависимость есть, но ввиду сильной нелинейности, отсутствия к ней интереса у экспериментаторов и нежелания усложнять формулы для расчета дальнобойности малозначительными факторами зафиксирована не была [20].

В табл. 2 приведены результаты расчета дальнобойности воздушной струи при различных параметрах ее стеснения, полученные по разным формулам из табл. 1. Несложно заметить, что разброс прогнозных значений дальнобойности между максимальным и минимальным значениями составляет 10–15 м при средних значениях 15–25 м в зависимости от степени стеснения струи. Учитывая, что разлет осколков горной породы при проходке выработок буровзрывным

способом равен 19–30 м, можно заключить, что точность определения дальности распространения воздушной струи является недостаточной для обоснования оптимального расстояния отнесения вентиляционных труб от забоя, обеспечивающего нормальное проветривание при минимальных повреждениях конца вентиляционного става осколками.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета дальнотойности струи по формулам различных авторов из табл. 1

Площадь сечения выработки $S$ , м <sup>2</sup>	Приведенный диаметр $D$ выработки, м	Диаметр конца трубопровода $d$ , м	Степень стеснения струи $n$	Значение $L$ по формулам разных авторов								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
9.0	2.9	0.6	4.8	20.1	14.3	11.0	21.0	14.6	16.1	17.9	13.53	12.0
14.0	3.5	0.8	4.4	24.6	17.5	14.8	27.0	20.3	18.7	22.0	16.87	14.97
16.0	3.9	0.8	4.9	26.8	19.0	15.2	27.6	22.3	20.0	23.9	18.04	16.0
19.0	4.1	0.8	5.1	28.5	20.0	16.7	30.0	25.9	21.1	25.5	19.65	17.43
20.0	4.3	0.9	4.8	30.0	21.3	17.4	31.2	27.3	21.8	26.7	20.17	17.89
22.0	4.8	1.0	4.8	33.6	23.8	18.6	33.0	34.1	23.9	29.8	21.15	18.76

В [19] предложено избавиться от неопределенности путем интерполяции зависимостей для расчета дальнотойности струи  $L$  от сечения выработки  $S$  при оптимальном стеснении вариационным рядом в приближении нормального распределения его коэффициентов [21], хотя и отмечено несоответствие нормальному закону. В результате усреднения получена следующая формула:

$$L = 5.9\sqrt{S}. \tag{1}$$

Ниже представлены рассчитанные по ней значения дальнотойности струи, превышающие в 2–4 раза предельно допустимое отставание става вентиляционных рукавов и труб сжатого воздуха, указанного в [1, 3]:

Площадь сечения $S$ , м <sup>2</sup>	10.2	14.9	15.89	20.8	25.0	48.0
Дальнотойность струи $L$ , м	18.8	22.7	23.50	26.9	29.5	40.8

Проведены исследования влияния расстояния от груди забоя до вентиляционных труб на эффективность проветривания на рудниках “Октябрьский” и “Таймырский” ЗФ ПАО “ГМК “Норникель”. Путем последовательного увеличения длины выработки фиксировалось превышение предельно допустимых концентраций в воздухе оксидов углерода и азота. Установлено, что зависимость (1) дает завышенные результаты для значений  $L$ , при которых ПДК вредных газов превышена, и должна быть скорректирована коэффициентами 0.61 при проветривании сжатым воздухом и 0.68 — при проветривании с помощью ВМП. Таким образом, коэффициенты при  $\sqrt{S}$  для расчета дальнотойности струи, полученные в натурном эксперименте, соответствуют скорее нижней области результатов лабораторных исследований, представленных в табл. 2, а не усредненной зависимости (1).

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАЛЬНОТОЙНОСТИ СТРУИ

Выполненный анализ несоответствия экспериментальных данных теории и большого расхождения результатов, полученных разными исследователями, наводит на мысль о наличии неучтенного фактора процесса перемешивания воздушных потоков, которым может быть

начальная скорость движения воздуха в половине сечения выработки, определяющаяся дебетом струи. В [22] предложена аналитическая модель перемешивания встречных потоков воздуха (рис. 1), на основании которой выведена формула для расчета убывания расхода воздуха в зависимости от начального расхода струи:

$$q(x) = q_0 e^{-\frac{Cx}{H}}, \tag{2}$$

где в предположении свободной турбулентности воздуха для коэффициента вязкости получено  $C = 0.47$ ;  $H$  — поперечный размер выработки.

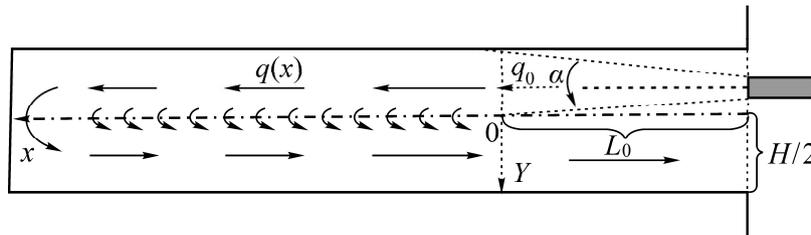


Рис. 1. Модель движения воздуха в тупиковой выработке

Верификация и уточнение аналитической зависимости (2) проводились численным моделированием в программном комплексе SolidWorks распространения настилающейся воздушной струи в тупиковой выработке при различных начальных скоростях струи от 5 до 80 м/с. Независимо от скорости, струя раскрывалась до половины сечения выработки на одинаковом расстоянии ~11 м, после чего происходило движение воздуха по инерции с постепенным перемешиванием встречных потоков воздуха. Дальнобойность струи определялась по явному замыканию воздушного вихря со скоростью не меньшей 0.25 м/с и отмечена на рис. 2 сглаженной штриховой линией. Таким образом, гипотеза о зависимости дальнобойности струи от начальной скорости подтвердилась, но значение коэффициента  $C$  в (2) в соответствии с полученными результатами оказалось не постоянным, а уменьшающимся по ходу движения воздуха с 2 до 0.29. Результаты численного моделирования дальнобойности  $L$  настилающейся струи вентилятора ВМ-12 (1.2 м в диаметре), направленной в тупиковую выработку диаметром 4 м при разных начальных скоростях движения воздуха  $V$ , представлены ниже:

$V$ , м/с	5	10.00	20.00	30.00	40.0	50.00	60.00	70.00	80.00
$L$ , м	12	16.00	24.00	30.00	37.0	42.00	49.00	55.00	56.00
$C$	2	0.97	0.62	0.49	0.4	0.37	0.33	0.29	0.29

Непостоянство  $C$  не является неожиданным, так как при выводе (2) коэффициент турбулентной вязкости в модели принимался постоянным, а в реальности турбулизация воздуха существенно падает в направлении груди забоя по мере уменьшения расхода и трения встречных потоков. Согласно аэродинамической характеристике вентилятора ВМ-12, его дебет соответствует скорости движения воздуха в половине сечения ~20–30 м/с в зависимости от угла установки лопаток, что дает глубину проветривания тупиковой выработки ~24–30 м. Но, как следует из результатов моделирования, дальнобойность струи может быть увеличена почти в 2 раза путем увеличения ее начальной скорости, что позволяет полностью убрать воздухопровод из зоны его поражения осколками породы при добыче полезного ископаемого буровзрывным способом.

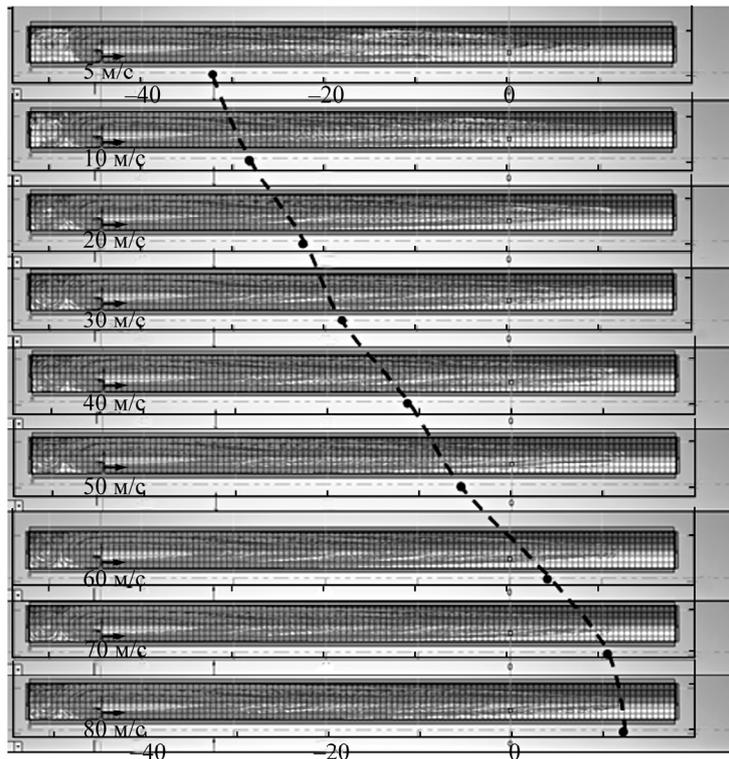


Рис. 2. Результаты численного моделирования распространения стесненной настилающейся струи, направленной в тупик “→”, при разных начальных скоростях движения воздуха: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 и 80 м/с. Поперечный размер выработки 4 м, диаметр вентилятора 1.2 м. Размер ячейки масштабной сетки  $2/3 \times 2/3$  м; -●- дальнобойность струи

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенного анализа экспериментальных данных и численного моделирования распространения направленной в тупик воздушной струи сделаны следующие выводы:

— требования норм безопасности, в соответствии с которыми отставание конца воздухопровода от груди забоя не должно превышать 5–12 м, являются чрезмерно жесткими, не учитывающими остаточную инерционность воздушного потока после раскрытия струи;

— разброс дальнобойности направленных в тупик воздушных струй по данным разных исследователей составляет 50 % от среднего значения и не позволяет сделать достоверный прогноз проветривания тупиковой выработки;

— результаты аналитического и численного моделирования свидетельствуют о том, что глубина проветривания тупика воздушной струей зависит от ее начальной скорости, что не соответствует официальной позиции о независимости дальнобойности тупиковой струи от скорости и, возможно, является причиной расхождений в экспериментальных данных;

— к эффективным ресурсосберегающим решениям при проветривании тупиковых выработок следует отнести увеличение скорости подачи воздуха в воздухопровод, позволяющее отодвинуть его от груди забоя на безопасное для проведения буровзрывных работ расстояние.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых”, утв. приказом Ростехнадзора № 505 от 08.12.2020 г., рег. № 61651 Минюста от 21.12.2020 г., вступили в силу с 01.01.2021 г.

2. **Федеральные нормы и правила** в области промышленной безопасности “Правила безопасности в угольных шахтах”, утв. приказом Ростехнадзора № 507 от 08.12.2020 г., рег. № 61587 Минюста от 18.12.2020 г., вступили в силу с 01.01.2021 г.
3. **Zhang X., Zhang Y., and Tien J. C.** The efficiency study of the push-pull ventilation system in underground mine, Proc. of the 2011 Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 18–20 February 2019. — P. 224–230.
4. **Левин Л. Ю., Исаевич А. Г.** Работы по программе “Апатиты” // Горное эхо. — 2016. — № 4 (65). — С. 24–27.
5. **Колесов Е. В., Казаков Б. П.** Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2020. — Т. 331. — № 7. — С. 15–23.
6. **Колесов Е. В.** Разработка методики расчета количества воздуха, требуемого для проветривания тупиковых проходческих выработок после взрывных работ // Горное эхо. — 2019. — № 3. — С. 80–84.
7. **Левин Л. Ю., Семин М. А.** Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 120–130.
8. **Казаков Б. П., Шалимов А. В., Гришин Е. Л., Кормщиков Д. С.** Оценка параметров пожара в горизонтальной горной выработке на основе аналитического моделирования процесса адвекции тепла // ФТПРПИ. — 2020. — № 6. — С. 179–185.
9. **Розенберг В. Н.** Аэродинамика струи, бьющей в тупик. — Л.: ЦКТИ им. Ползунова, 1951. — С. 65–87.
10. **García-Díaz M., Sierra C., Miguel-González C., and Pereiras B.** A discussion on the effective ventilation distance in dead-end tunnels, *Energies*, 2019, No. 12. — P. 1–5.
11. **Батурин В. В.** Основы промышленной вентиляции. — М.: Профиздат, 1990. — 448 с.
12. **Воронин В. Н.** Основы рудничной аэрогазодинамики. — М.: Углетехиздат, 1951. — 491 с.
13. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. — М.: Физматгиз, 1960. — 472 с.
14. **Вассерман А. Д.** Проектные обоснования параметров рудников и подземных сооружений. — Л.: Наука, 1988. — 211 с.
15. **Талиев В. Н.** Аэродинамика вентиляции. — М.: Стройиздат, 1979. — 162 с.
16. **Паршин Я. Д.** О некоторых физических явлениях при вымывании вредностей из тупиковых выработок // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов (тр. Всесоюз. конф.). — Апатиты, 1977. — С. 81–83.
17. **Мостепанов Ю. Б.** Исследование дальнобойности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки // Горн. журн. — 1978. — № 11. — С. 47–50.
18. **Козырев С. А., Амосов П. В.** Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в пром-сти. — 2012. — № 10. — С. 79–84.
19. **Методика** расчета количества воздуха и организации проветривания подземных рудников ОАО “Апатит”. — Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, 2008.
20. **Branny M., Jaszczur M., Wodziak W., and Szmyd J.** Experimental and numerical analysis of air flow in a dead-end channel, *J. of Physics, Conference Series* 745, 2016. — P. 1–8.
21. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей. — М.: Физматгиз, 1969. — 376 с.
22. **Казаков Б. П., Шалимов А. В., Левин Л. Ю.** Проветривание выработок большого сечения с помощью вентиляторных установок, работающих без перемычки // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2010. — № 2. — С. 89–97.

*Поступила в редакцию 24/VI 2021  
После доработки 15/VII 2021  
Принята к публикации 24/XII 2021*