

6. Мальцев А.А., Тронников А.И. Оценка вероятности безотказной работы галтели рабочего валка по критерию циклической прочности // Оригинальные исследования. – 2020. – Т. 10, №. 9. – С. 102-109.
7. Костичев В.Э. Применение динамического моделирования для оценки влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости // Вестник СГАУ. – 2015. – Т. 14, №. 1. – С. 147-153. – DOI: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-147-153.
8. Коротков М.М. Ультразвуковая толщинометрия: учеб. пособие. – Томск: изд-во ТПУ, 2008. – 94 с.
9. Арон А.В., Леонтьев Л.Б., Флорианская М.В. Повышение надежности втулок цилиндров судовых ДВС при трещинообразовании в галтели опорного бурта // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – №. 5. – С. 36-41.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.4.20

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТСТАВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА ОТ ГРУДИ ЗАБОЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЗДУХООБМЕНА В ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

А.В. Таций

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Данная работа посвящена анализу влияния величины отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя на интенсивность воздухообмена. В работе приводятся результаты численного моделирования процесса проветривания тупиковой горной выработки с использованием вентиляционного трубопровода нагнетательным способом. Геометрические параметры выработки соответствуют типовым выработкам полиметаллических рудников, проводимых буровзрывным способом. Результаты исследования указывают на возможность увеличения отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя без ухудшения интенсивности массообмена вблизи тупикового забоя. Этот вывод важен с точки зрения ресурсосбережения и повышения энергоэффективности проветривания тупиковых горных выработок. Полученные результаты могут быть применены при отступлении от пункта 182 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых».

**Ключевые слова:** рудник, тупиковая выработка, нагнетательный способ проветривания, воздухообмен, массообмен, безопасность.

### Введение

В современных условиях при увеличении интенсивности ведения горнопроходческих работ необходим постоянный контроль за безопасностью. В части проветривания тупиковых горных выработок существует ряд обязательных требований, предписанных Федеральными нормами и правилами промышленной безопасности [1], которые, в частности, устанавливают, что отставание вентиляционных труб от забоя не должно превышать 10 метров при площади сечения забоя не более 16 метров, а при площади сечения забоя более 16 метров величина отставания вентиляционных труб не должна превышать 15 метров.

Соблюдение данного требования замедляет скорость ведения горных работ, а также снижает энергоэффективность вентиляции. Это связано прежде всего с тем, что в выработках, проводимых буровзрывным способом, при соблюдении раннее приведенного требования регулярно происходит повреждение вентиляционного трубопровода, что приводит к простоем горных работ вследствие нарушения вентиляции [2].

Результаты многочисленных исследований указывают на то, что для калийных и полиметаллических рудников, не опасных по газам, данное требование является чрезмерно жестким [3-6]. Анализ проводился как с привлечением аппарата вычис-

лительной механики жидкости и газа [3, 4], так и в рамках одномерных подходов [6, 7]. При этом авторы уделяли большее внимание вопросам определения динамики выноса вредных примесей из тупиковой выработки, не проводя при этом детальный анализ закономерностей распределения воздушных потоков внутри выработки. В то время как понимание особенностей вихревого движения воздуха в тупиковой выработке также крайне важно для формулировки выводов относительно возможности увеличения отставания конца вентиляционного трубопровода от груди забоя. Настоящее исследование направлено на устранение данного пробела. В статье описаны результаты исследования закономерностей движения воздушных потоков в тупиковой выработке при различных отставаниях конца вентиляционного трубопровода от тупикового забоя.

### Разработки модели

В настоящий момент для описания массообмена в тупиковых горных выработках, проветриваемых нагнетательным способом, могут применяться различные модели перемешивания встречных потоков воздуха. Подходы для создания этих моделей могут быть основаны на использовании 3D моделирования или аналитических подходов. Так, к примеру, в [7] предложена одномерная модель, основанная на следующих приближениях.

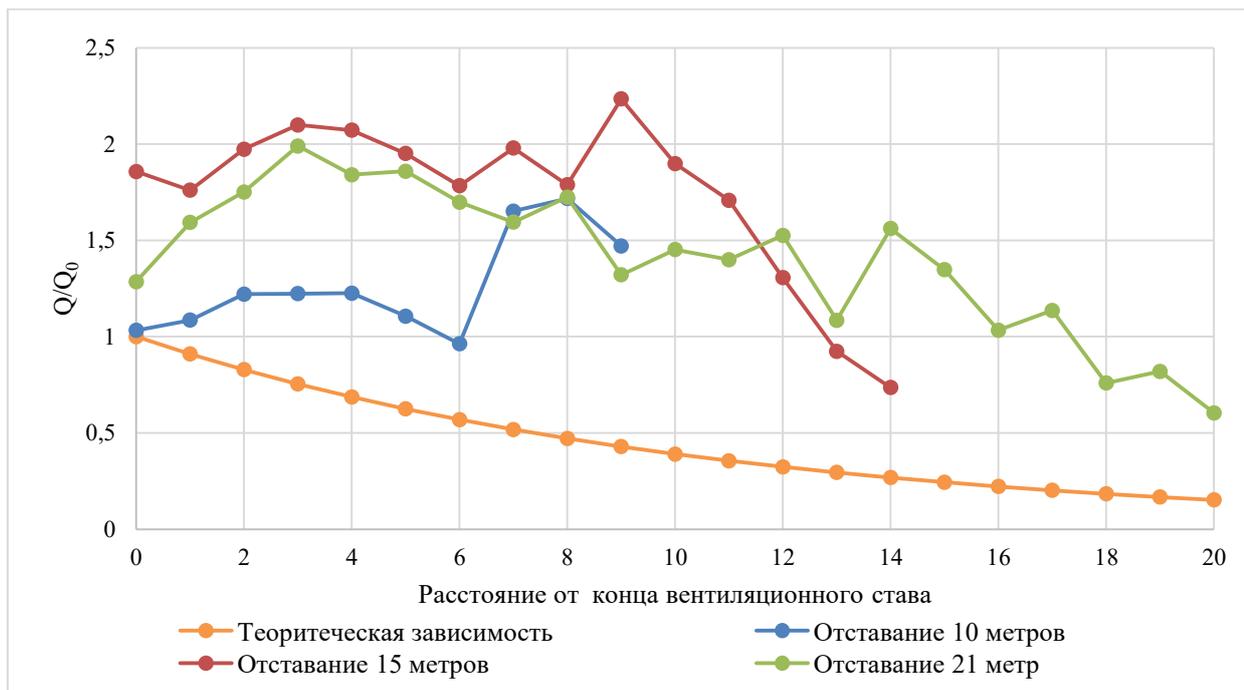
1. Струя расширяется до половины сечения выработки с неизменным расходом. После раскрытия струи движение воздуха представляет собой горизонтальное движение двух встречных потоков одинакового сечения.
2. Уменьшение расхода воздуха после раскрытия струи происходит в результате непрерывного перетекания воздуха из прямого в обратный поток в результате вязкого трения потоков между собой.
3. Коэффициент турбулентной вязкости на границе потоков моделируется так же, как и для свободной осесимметричной струи [8].

Данная модель использована авторами в [7], чтобы получить зависимость количества воздуха,двигающегося к забою, от расстояния до конца трубопровода. Эта зависимость представлена на рис. 1. Количество воздуха,двигающегося к забою, по сути характеризует интенсивность массообмена в поперечном сечении выработки. График представляет собой экспоненциальную убывающую кривую, описываемую приведенным уравнением:

$$Q = Q_0 \cdot \exp\left(\frac{-0,47x}{H}\right) \quad (1)$$

где,  $Q$  – расход воздуха в поперечном сечении выработки, направленный в сторону груди забоя,  $Q_0$  – дебит вентилятора,  $H$  – высота выработки.  $x_0$  – расстояние от конца вентиляционного трубопровода в сторону забоя.

Однако в результате проведения нами натурного эксперимента в тупиковой горной выработке площадью 29,3 м<sup>2</sup> и дебитом вентилятора 17,4 м<sup>3</sup>/с получено, что интенсивность массообмена существенно иначе зависит от расстояния до конца трубопровода. Экспериментальные кривые для  $Q$  представлены на рис. 1 для отставаний конца трубопровода от забоя, равных 10, 15 и 21 метр. В зависимости от отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя графики интенсивности массообмена в тупиковой горной выработке и график теоретической зависимости, очевидно, различаются. Данные эксперимента позволяют предположить, что воздухообмен в тупиковой горной выработке может изменяться по иному закону, нежели по представленной аналитической зависимости.



**Рис. 1.** Теоретическая и экспериментальные зависимости интенсивности массообмена в тупиковой горной выработке

В попытке определить истинные закономерности и подтвердить наблюдаемые в эксперименте зависимости проведен анализ закономерности влияния величины отставания вентиляционного трубопровода, а также скорости потока свежего воздуха, на величину интенсивности массообмена, с использованием альтернативного подхода – трехмерного численного моделирования.

Объектом исследования в данной работе является тупиковая горная выработка (рис. 2), проветриваемая вентиляционным трубопроводом нагнетательным способом. Отставание конца вентиляционного трубопровода от тупикового забоя принято равным 10, 15, 20, 25, 30 и 35 метров. Высота и ширина выработки составляет 5 метров и соответствует выработкам проходимых буровзрывным способом на полиметаллических рудниках. Скорость воздушного потока на выходе из вентиляционного трубопровода принималась равной 15 м/с и 20 м/с.

Численное моделирование проводилось в программном продукте Ansys CFX. Для расчета применялась модель турбулентности Realizable K-Epsilon (RKE) [9-11]. Для вычисления интенсивности массообмена в поперечном сечении выработки необходимо определить результат отношения расхода потока воздуха в этом сечении, направленного в забой, и расхода воздуха, поступающего на проветривание выработки. Для определения расхода,двигающегося к забою (см. рис. 3), можно использовать формулу:

$$Q = \int_S \max\{-V_x, 0\} dS \quad (2)$$

Для построения графика интенсивности массообмена требуется вычислить распределение аэродинамических параметров в тупиковой выработке. Далее необходимо построить множество поперечных сечений вдоль продольной оси выработки и рассчитать интеграл (1) для рассматриваемых сечений.

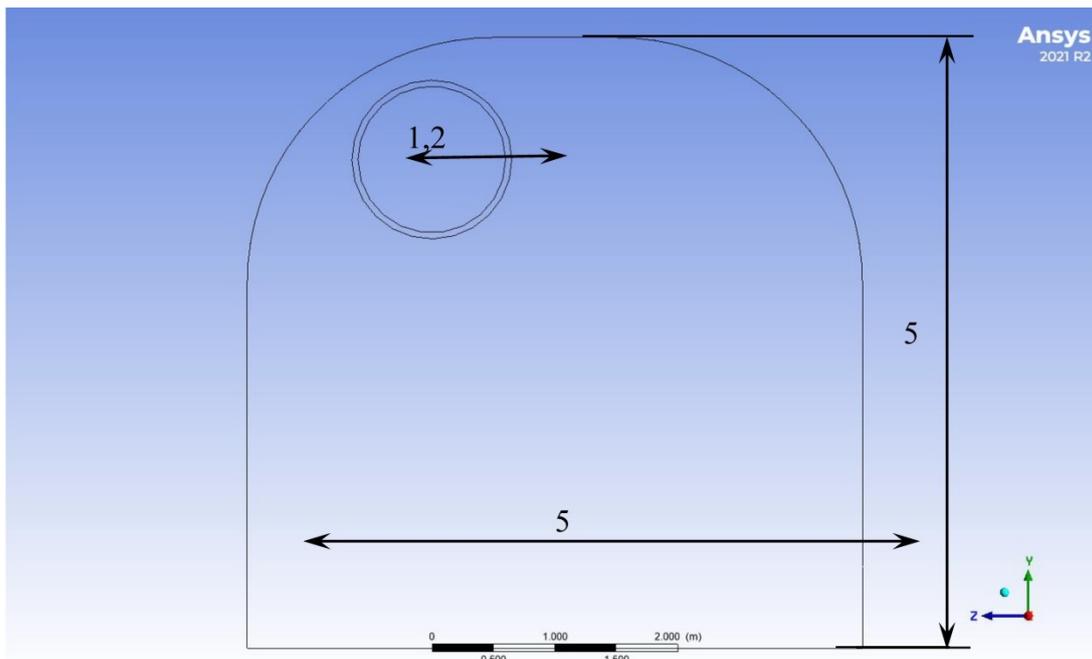


Рис. 2. Поперечное сечение выработки

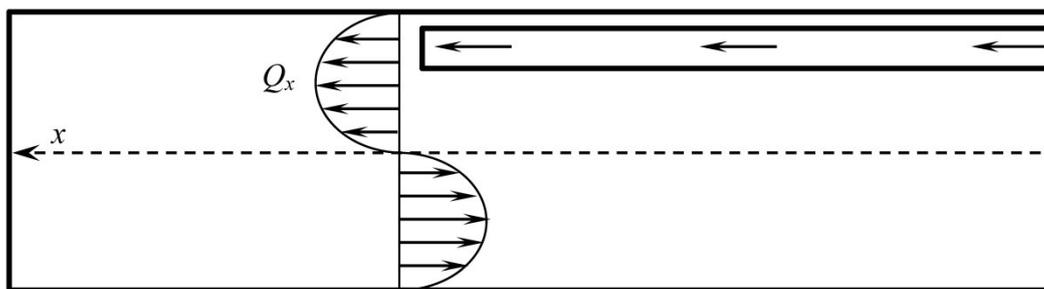


Рис. 3. Модель расчета количества воздуха в тупиковой выработке

### Результаты численного моделирования

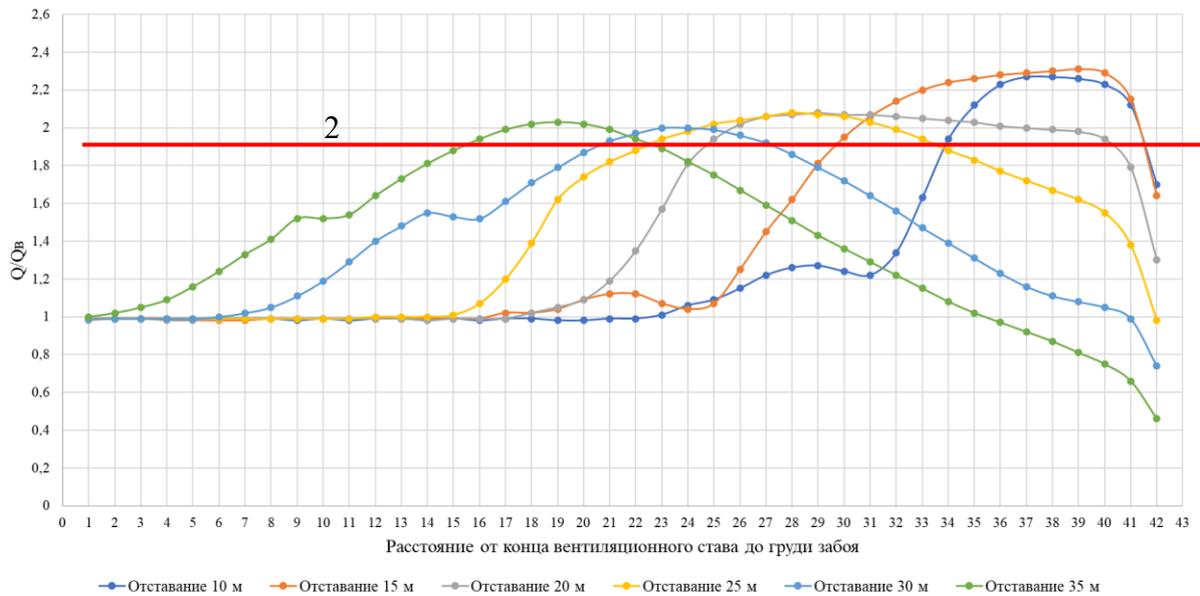
#### исследования интенсивности массообмена в тупиковой горной выработке

Результаты моделирования при отставании трубопровода в 10 и 15 метров от груди забоя представлены зависимостью безразмерного расхода воздуха  $Q$  и поступающего расхода воздуха  $Q_x$  по оси ординат,двигающегося к забою тупиковой горной выработки, от координаты  $x$  вдоль оси выработки (рисунок 4). По кривым можно наблюдать, что интенсивность массообмена резко возрастает после конца вентиляционного трубопровода, а при отставании трубопровода 20 метров и более интенсивность выходит на постоянное значение около 2 с отклонением не более 5%.

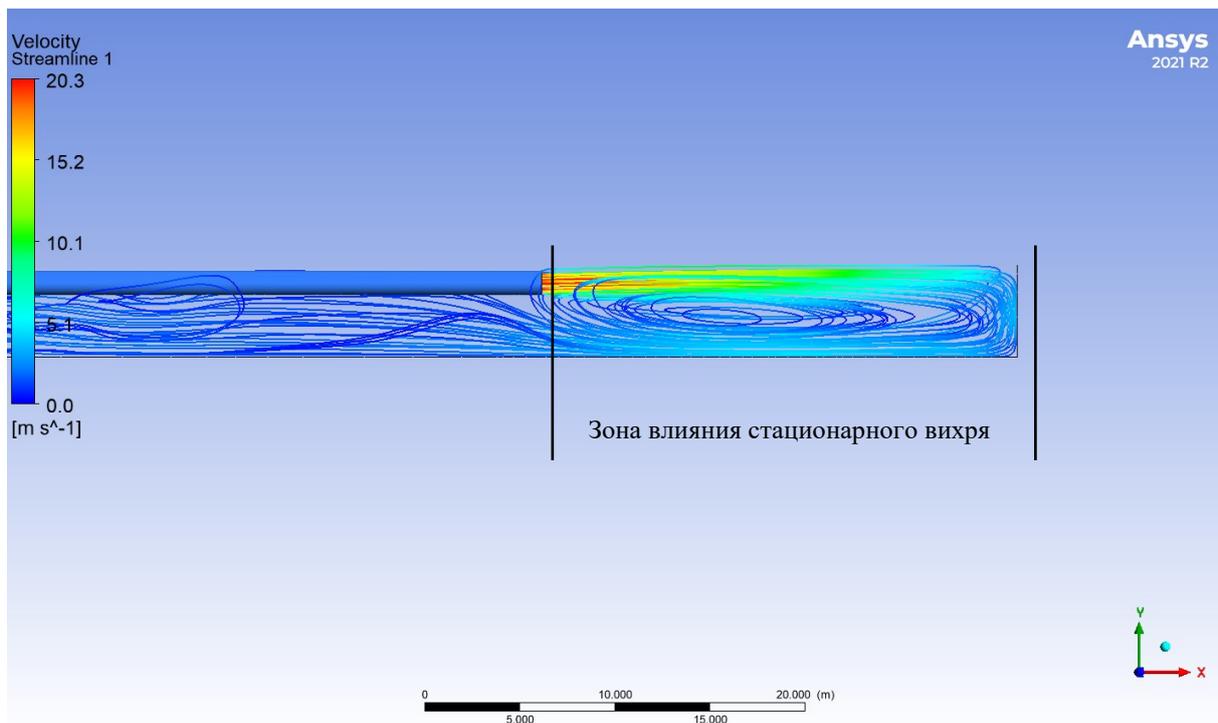
При увеличении скорости воздушного потока до 20 м/с (рисунок 6) кривые практически не изменяются, что позволяет сказать о том, что интенсивность массообмена слабо зависит от скорости потока воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода.

Увеличение интенсивности в сечении связано с возникновением стационарного вихря (рисунок 5) в области тупиковой выработки между забоем и областью, где располагается конец вентиляционного трубопровода [2].

Подобный эффект наблюдается и при других отставаниях от груди забоя, при которых пиковая интенсивность массообмена достигает значения 2,3. А при отставании трубопровода 20 метров и более интенсивность массообмена выходит на постоянное значение около 2, с отклонением не более 5%.



**Рис. 4.** Интенсивность массообмена при удалении вентиляционного трубопровода от груди забоя при скорости потока 15 м/с



**Рис. 5.** Стационарный вихрь при удалении конца вент. трубопровода от груди забоя на 25 метров при скорости потока 20 м/с

Границы влияния возникающего стационарного вихря показаны на рисунке 6. Границы определены зоной, в которой интенсивность массообмена  $\geq 1$  или зоной, в которой расход воздуха,двигающегося к забою, не ниже, чем на выходе из вентиляционного трубопровода. В пределах этой границы интенсивность массообмена считается достаточной для того, чтобы обеспечить перемешивание и вынос вредных примесей, образующихся после взрывных работ. При отставаниях трубопровода более 25 метров, эта зона имеет одинаковую протяженность и составляет около 30 метров. С практической точки зрения данное расстояние можно обосновать как такое отставание вентиляционного трубопровода от за-

боя, при котором забой обеспечен достаточным количеством воздуха при заданных геометрических параметрах выработки. Важно отметить, что выбранный критерий для определения границы достаточного проветривания является лишь одним из возможных, а конечный вывод об эффективном проветривании может быть сделан только после рассмотрения закономерностей нестационарного выноса вредных примесей. Тем не менее, полученный результат подтверждает результаты экспериментальных измерений и открывает перспективы для последующего обоснования отступления от требований пункта ФНиП, который устанавливает расстояние от груди забоя в 10 или 15 метров.

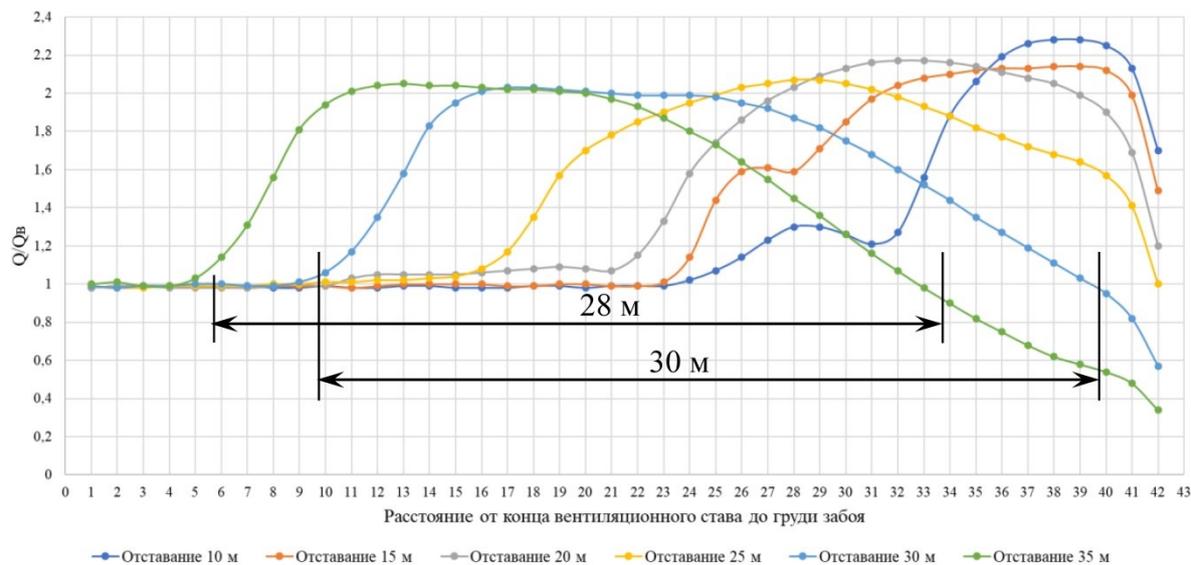


Рис. 6. Интенсивность массообмена при удалении вент. трубопровода от груди забоя при скорости потока 20 м/с

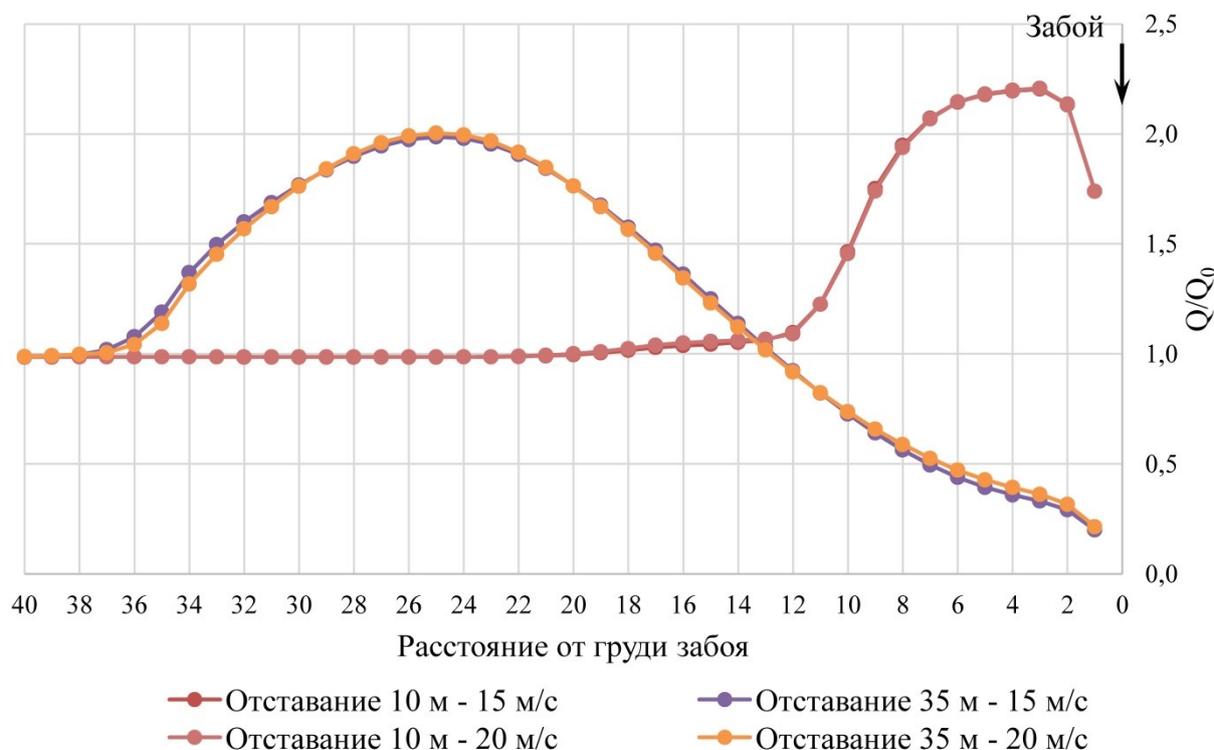


Рис. 7. Интенсивность массообмена при отставании от груди забоя на 10 и 35 метров при скорости потока 15 и 20 м/с

Результаты сравнения при скоростях входящего потока 15 и 20 м/с и отставании трубопровода на 10 и 35 метров представлены на рисунке 7. Наложение графиков при различных скоростях движения поступающего на проветривание потока воздуха подтверждает, что скорость входящего потока воздуха не влияет на интенсивность массообмена.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

1. При проветривании выработок нагнетательным способом у забоя выработки формируется устойчивый стационарный вихрь, интенсифицирующий массообмен.

2. Максимальная интенсивность массообмена зависит от отставания вентиляционного трубопровода; при больших отставаниях трубопровода (более 20 метров) она выходит на постоянное значение около 2 (для рассмотренных параметров задачи).

3. Нарастание интенсивности массообмена происходит по степенному закону с показателем, равным примерно 2 (отклонения не более 5%). В то время как убывание – по линейному закону.

4. Интенсивность массообмена не зависит от скорости потока воздуха, поступающего на проветривание тупиковой горной выработки.

5. Зона влияния возникающего стационарного вихря при принятых геометрических параметрах выработки, при котором интенсивность массообмена  $>1$ , составляет примерно 30 метров при отставании трубопровода 25 метров и более, что можно применить в обосновании для отступления от требований пункта ФНиП, который устанавливает расстояние от груди забоя в 10 или 15 метров.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
2. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Эжектирование возвратного потока воздуха для увеличения дальнобойности направленной в тупик воздушной струи // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 27-36. – DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3624.
3. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15-23. – DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.
4. Козырев С.А., Амосов П.В. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 79-84.
5. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Паршаков О.С., Богомятков А.В. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 112-118. – DOI: 10.15372/FTPRPI20220112.
6. Мостепанов Ю.Б. Исследование дальнобойности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки // Изв. вузов. Горн. журн. – 1978. – № 11. – С. 47-50.
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Паршаков О.С. О возможности проветривания тупиковых выработок беструбным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 195-199.
8. Дэйли Д.У., Харлеман Д. Механика жидкости: пер с англ. – М.: Энергия, 1971. – 480. С.: ил.
9. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5-33. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_5.
10. Левин Л.Ю., Газизуллин Р.Р., Зайцев А.В. Использование программного модуля Ansys CFX при решении научно-производственных задач проветривания шахт и рудников // САПР и графика. – 2011. – № 10. – С. 64-66.
11. Колесов Е.В., Казаков Б.П., Кузьминых Е.Г. Моделирование процесса изменения состава рудничного воздуха в наклонной тупиковой горной выработке // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 79-84. DOI: 10.7242/echo.2020.1.17.