УДК 622.411.32

В.Л.ТРУШКО, *д-р техн. наук, профессор, trushko@spmi.ru*
С.Г.ГЕНДЛЕР, *д-р техн. наук, профессор, sgendler@mail.ru*
А.А.ЯКОВЕНКО, *аспирант, lexxst@inbox.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.L.TRUSHKO, *Dr.in eng. sc., professor, trushko@spmi.ru*
S.G.GENDLER, *Dr.in eng. sc., professor, sgendler@mail.ru*
A.A.JKOVENKO, *post-graduate student, lexxst@inbox.ru*
National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВОЗДУХА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрены горно-технические особенности строительства подземных сооружений, определяющие выбор и параметры систем вентиляции и кондиционирования воздуха, предложены технические решения по повышению эффективности управления качеством воздуха.

***Ключевые слова*:** подземное пространство, транспортные тоннели, проветривание, температура воздуха, тупиковые выработки, рациональное воздухораспредление, энергетические затраты, радон, естественная тяга.

CONTROL OF AIR QUALITY DURING THE BUILDING OF UNDERGROUND CONSTRUCTION

The mine technical features of building of underground structures determining selection and parameters of ventilating systems and an air conditioning are reviewed, the engineering solutions on increase of control efficiency by quality of air are offered.

***Key words*:** underground space, traffic tunnels, ventilation, air temperature, blind drift, rational air distribution, power consumption, radon, nature draft.

Тенденция широкого использования подземного пространства, характерная для большинства развитых стран мира, в последнее время начинает все более интенсивно проявляться и в нашей стране. Одним из факторов, определяющих динамику ее положительного развития, является возможность обеспечения на всех стадиях сооружения подземных объектов безопасных и эффективных условий труда, что, в свою очередь, требует поддержания в строящихся горных выработках необходимого качества воздуха, т.е. совокупности его термодинамических, химических и физико-химических параметров, удовлетворяющих нормативным значениям.

В отличие от предприятий горнодобывающего профиля, подземные сооружения отличаются рядом специфических особенностей, влияющих на выбор способов управления качеством воздуха:

1. Сравнительно невысокая глубина расположения подземных сооружений (ПС), равная 30-250 м, что приводит к значительному влиянию атмосферных условий на проветривание горных выработок и формирование в них микроклимата.

2. Конструктивные размеры горных выработок, сечения которых составляют 75-80 м^2, а в ряде случаев, например, для сбросных гидротехнических туннелей достигают 150 м^2. Длина тупиковых частей выработок

в зависимости от функционального назначения объекта и схемы организации строительства колеблется в достаточно широких пределах от первых сотен до нескольких тысяч метров.

3. Организация одновременной проходки одной или нескольких выработок, при этом направление проходки может быть как противоположенным, так и встречным.

4. Наличие в строящемся подземном объекте одновременно проходимых тупиковых выработок и уже пройденных участков со сквозной вентиляционной струей, где осуществляются строительно-монтажные работы (установка постоянной обделки, укладка рельсов, навеска электрических кабелей и осветительных приборов и т.п.).

Таким образом, поддержание нормативных параметров воздуха необходимо в каждой точке сети выработок, т.е. упоминаемое в Правилах безопасности при строительстве подземных сооружений (ПБ 03-428-02) понятие рабочая зона распространяется практически на все выработки ПС.

Вышеперечисленные особенности, в первую очередь, характерны для подземных сооружений транспортного назначения. Например, во время строительства Северо-Муйского тоннеля максимальная протяженность тупиковой части со стороны восточного крыла превышала 4500 м. В то же время длины тупиковых выработок тоннеля со стороны западного крыла составляли всего 200-300 м. При этом в одновременной проходке находилось четыре забоя, два из которых двигались навстречу друг другу, а два других в противоположенные стороны. Все работы по проходке тоннеля были локализованы в пределах участка, имеющего длину, не более 1500 м. В процессе строительстве этого тоннеля было сооружено четыре ствола различной глубины, что во время строительства привело к образованию участков выработок со сквозной вентиляционной струей.

Аналогичная ситуация сложилась и в период завершения строительства одной из линий Санкт-Петербургского метрополитена, когда в одновременной проходке находилось четыре забоя. В то же время на шести станциях и прилегающих к ним перегонных тоннелях велись монтажно-строительные работы. В этих условиях поддержание нормативного качества воздуха было связано с необходимостью обеспечения в рабочих зонах нижнего предела температуры воздуха, превышающего значение естественной температуры пород. Сложность, а подчас и невозможность выполнения этого требования, определялась, с одной стороны, значительной протяженностью выработок метрополитена, а с другой – сравнительно невысокими значениями естественной температуры пород, окружающих выработки. Расчеты, выполненные для условий Санкт-Петербургского метрополитена, показали, что при длине перегонного тоннеля, превышающей 800-1000 м, температура воздуха $t_{\text{п}}$, независимо от величины его подогрева в начале вентиляционного пути, стремится к естественной температуре пород, составляющей 4-12 °С (рис.1).

Таким образом, для обеспечения в выработках строящегося метрополитена температуры воздуха, отличной от естественной температуры пород, пришлось бы сооружать сложную систему круглогодичного ступенчатого подогрева воздуха, суммарная мощность которой достигала нереально высоких значений.

Одним из основных путей снижения стоимостных показателей при обеспечении требуемого качества воздуха является переход к энергосберегающим системам подачи и обработки воздуха. Первым шагом на этом пути следует считать достижение рационального воздухопотребления. Одним из этапов решения данной задачи следует считать проверку и уточнение для условий выработок зависимостей по расчету потребного количества воздуха, а также обоснование рациональных схем его подачи к рабочим местам. Например, использование при проходке выработок с сечением $S_{\text{в}} > 40$ м^2 буровзрывного способа выдвигает на первое место необходимость обеспечения забоев воздухом по фактору разбавления газов от взрывных работ. В этом случае при вычислении необходимого количества воздуха одним из наиболее существенных парамет-

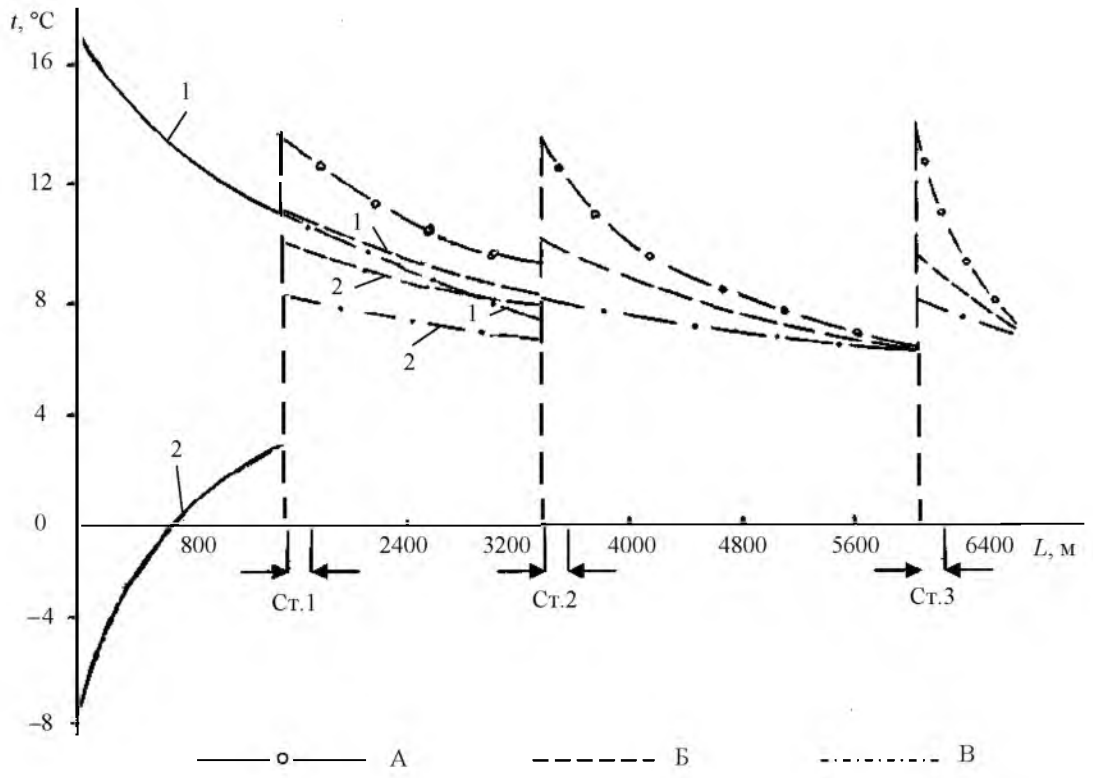


Рис.1. Изменение температуры по длине вентиляционного пути для условий завершающего этапа строительства одной из линий Санкт-Петербургского метрополитена
1 и 2 – июльские и январские значения температуры атмосферного воздуха; А, Б и В – при $t_п$, равной 14, 10 и 8 °С соответственно

ров является критическая длина выработки $L_{кр}$. Между тем, выполненный нами анализ свидетельствует о том, что значения $L_{кр}$, вычисленные по различным формулам, могут отличаться в 2,5-3 раза и существенно зависят от сечения выработок. Например, для воздуховода диаметром 1 м, собранного из звеньев длиной 3 м, имеющего коэффициенты удельной воздухопроницаемости и аэродинамического сопротивления соответственно 0,0004 и 0,0025 Н·с^2/м^4, $L_{кр}$ изменяется от 750 м при $S_в = 12$ м^2 до 260 м при $S_в = 30$ м^2. В то же время согласно рекомендациям, изложенным в «Руководстве по проектированию вентиляции угольных шахт», $L_{кр}$ при длине тупиковых выработок более 500 м следует принимать равными этой величине. В этой связи автоматический перенос данных рекомендаций на выработки ПС может привести к существенному завышению необходимого количества воздуха, а, следовательно, и к более высоким энергетическим затратам на организацию проветривания и тепловую обработку воздуха.

При проходке буровзрывным способом нескольких выработок (или одной выработки несколькими забоями) общее количество воздуха обычно определяют суммированием расходов, вычисленных по фактору расхода взрывчатых веществ для каждой выработки (забоя), имея в виду, что этот фактор является превалирующим над всеми остальными. Между тем, опыт показывает, что взрывные работы осуществляются одновременно не более, чем в двух забоя. Поэтому и подача воздуха в количестве, соответствующем максимальной величине, должна осуществляться только в те забои, где это необходимо в данный временной период. Количество воздуха, направляемое в остальные выработки (забои), может быть равно минимально необходимому количеству. Математически данное условие выражается формулой

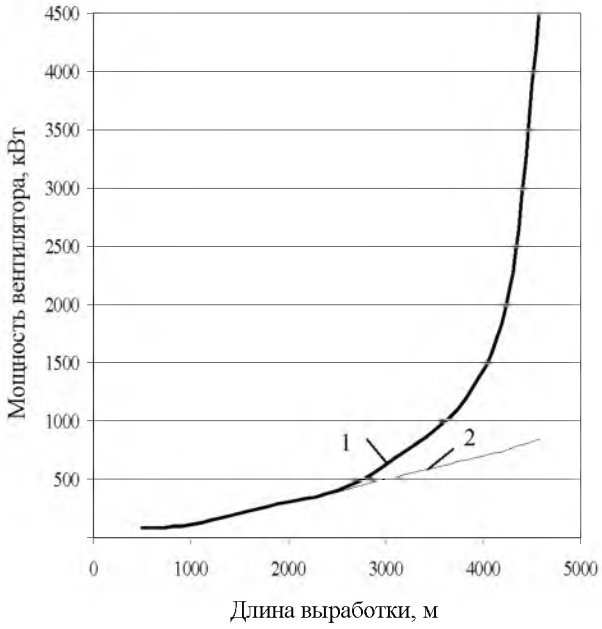


Рис.2. Энергозатраты на вентиляцию тупиковой выработки в зависимости от ее длины для каскадной (1) и рассредоточеной (2) схем проветривания

$$\sum Q = \sum_{1}^{j} Q_{\max i} + \sum_{1}^{n-1} Q_{\min i},$$

где $\sum Q, \sum_{1}^{j} Q_{\max i}$ и $\sum_{1}^{n-1} Q_{\min i}$ – соответственно общее количество воздуха, количество воздуха, подаваемое в j забоев после осуществления там взрывных работ, и количество воздуха, подаваемое в остальные $(n-j)$ забоев; n – общее число выработок (забоев).

Предложенный подход к установлению количества воздуха определяет необходимость организации мобильного перераспределения его расходов между забоями, в которых были произведен взрыв, и забоями, в которых ведутся вспомогательные работы (бурение, зарядка шпуров, установка крепи и т.п.). Одним из путей достижения такого перераспределения без изменения режимов работы вентиляционных установок является использование параллельных вентиляционных ставов, подсоединенных к одному вентилятору с последующим изменением аэродинамического сопротивления одного из воздуховодов, например, с помощью задвижек, уменьшающих его сечение. При использовании двух вентиляционных ставов расходы воздуха, поступающие в каждый из них, соответственно

$$Q_1 = \sum Q / [1 + Q_{01} R_1 / (Q_{02} R_2)],$$

$$Q_2 = \sum Q / [(1 + Q_{02} R_2 / (Q_{01} R_1)],$$

где Q_{01}, Q_{02} и R_1, R_2 – соответственно количество воздуха, подаваемое в каждый из двух забоев, и аэродинамические сопротивления вентиляционных ставов.

Опыт строительства и проектирования ряда транспортных подземных сооружений (Северо-Муйский тоннель, тоннельный переход под проливом Невельского) показывает, что при значительной длине тупиковых выработок и невозможности использования для организации их проветривания других выработок (например, системы параллельных выработок или скважин) единственным способом доставки воздуха к забоям является применение каскадной или рассредоточенной схем расположения вентиляторов. И та и другая схемы, в конечном итоге, приводят к значительным затратам энергии. Однако выполненные нами расчеты позволили дать оценку рациональных схем установки вентиляторов с учетом энергетических затрат на организацию проветривания (рис.2.)

Так, в зависимости от величины потребного количества воздуха применение каскадной схемы установки вентиляторов ограничено длиной тупиковых выработок – 2000-2500 м. В этом случае энергозатраты составляют 450-500 кВт. При большей протяженности выработок энергозатраты начинают интенсивно повышаться, достигая при длине 4500 м 4500 кВт.

В то же время энергозатраты при использовании рассредоточенной схемы расположения вентиляторов с увеличением длины тупиковой выработки растут более монотонно, изменяясь в пределах 500-800 кВт. Следует также отметить, что применение рассредоточенной схемы расположения вентиляторов приводит к существенному сокращению количества свежего воздуха, подаваемого в вентиляционный став. Последнее, естественно, вызывает пропор-

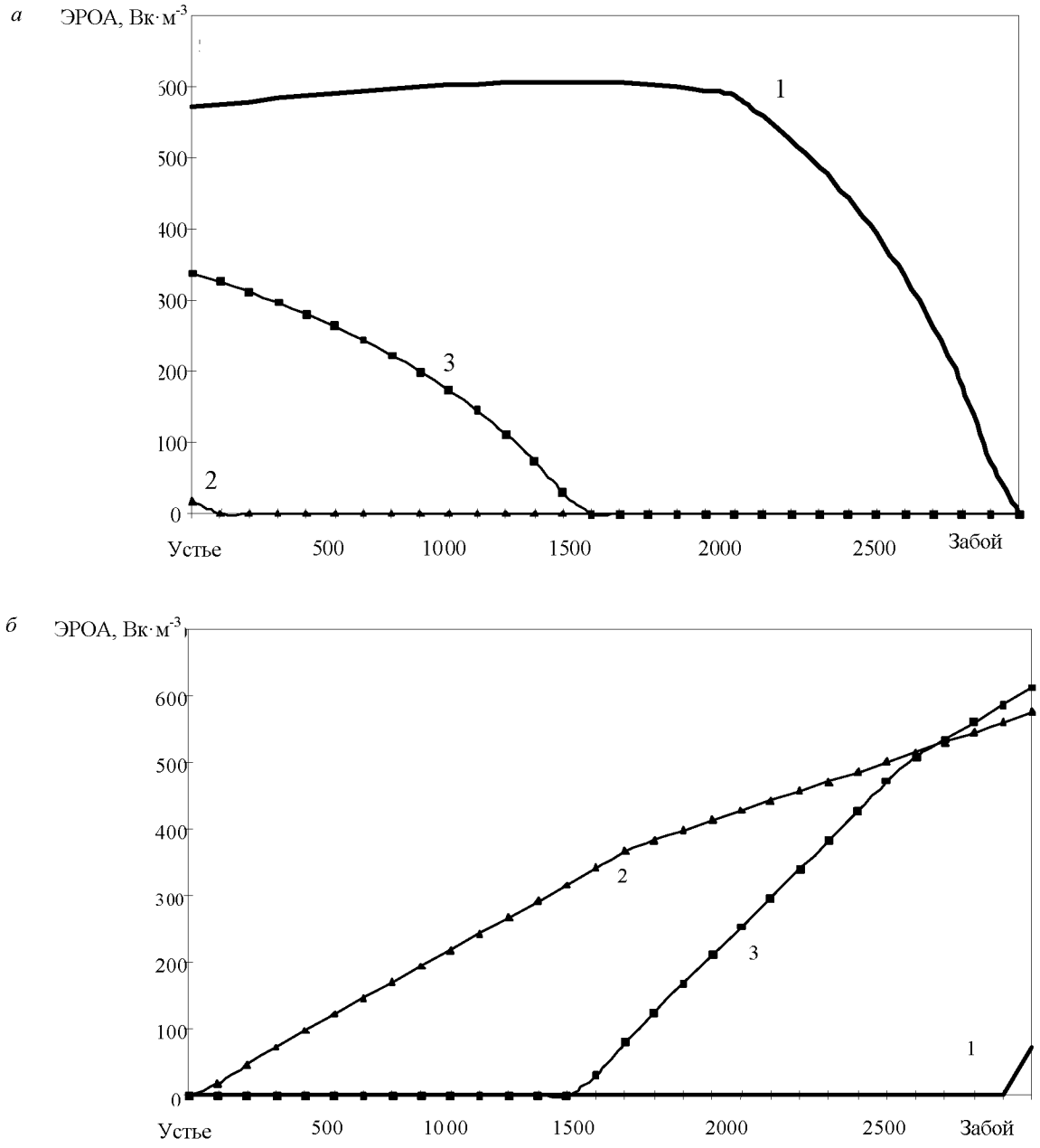


Рис.3. Распределение ЭРОА радона по длине выработки при нагнетательном (*а*) и всасывающем (*б*) способах проветривания. Интенсивность радоновыделения 5 Вк·м$^{-3}$·с$^{-1}$. Источник выделения радона распределен на длине 100 м
1, 2 и 3 – источник у забоя, устья и в центральной части выработок соответственно

циональное сокращение и энергетических затрат на подогрев воздуха в зимнее время.

Выбор способа проветривания тупиковых выработок в определенной степени зависит от характера распределения вредных факторов по длине выработки. Например, при поступлении в выработку радона на выбор способа проветривания оказывает влияние месторасположение его источника по длине выработки. Это объясняется тем, что наибольший вред здоровью людей приносит не собственно радон, а дочерние продукты его распада, которые образуются в воздухе через некоторый промежуток времени после

насыщения воздуха радоном. В этой связи выбранный способ проветривания должен обеспечивать минимальное время движения воздуха, загрязненного радоном, по выработкам, где находятся люди. Таким образом, при выделении радона непосредственно в забое тупиковой выработки наиболее рациональной являются всасывающая или комбинированная схемы проветривания. И, наоборот, при поступлении радона в воздух на устье выработки следует ориентироваться на нагнетательную схему (рис.3).

Во всех остальных случаях обоснованный выбор схемы проветривания необходимо осуществлять на основе расчета распределения эквивалентной равновесной активности радона по длине выработки и сопоставления этой расчетной величины с ее нормативным значением. Следует отметить, что топология источников радона будет оказывать влияние на выбор схемы проветривания и определение расхода воздуха и в период осуществление на участках со сквозной вентиляционной струей монтажно-строительных работ.

Выявленный характер формирования параметров воздушной среды в выработках ПС в зависимости от изменения атмосферных условий, помимо негативных факторов, приводящих к несанкционированному попаданию в выработки холодного наружного воздуха, приводящего к развитию процессов наледеобразования, или воздуха, содержащего вредные вещества в результате контакта с исходящей вентиляционной струей (данное явление было зарегистрировано нами при исследовании вентиляции Северо-Муйского тоннеля, когда при определенных направлениях ветра и скорости его движения возникала рециркуляция между поступающей в воздуховод и исходящей из ствола вентиляционными струями) дает возможность сократить энергозатраты на вентиляцию за счет использования для организации проветривания выработок естественной тяги.

Очевидно, что эффективность этого способа будет зависеть от величины и направления естественной тяги в течение годового периода, а также устойчивости ее действия. В любом случае заключение об использовании естественной тяги для проветривания сквозных участков, строящегося ПС, вместо механической вентиляции может быть сделано только после выполнения специальных исследований, устанавливающих продолжительность периодов ее стабильного действия, и последующим рассмотрением и согласованием полученных результатов в органах Ростехтехнадзора.

Например, в основу обоснования возможности использования естественной тяги для проветривания сквозных участков Северо-Муйского тоннеля были положены данные замеров в натурных условиях и результаты расчетного анализа, которые позволили показать, что в течение годового периода естественная тяга обеспечивает стабильное поступление свежего воздуха в выработки тоннеля. Исключение представляли лишь переходные период (сентябрь – октябрь, март – апрель), когда величина естественной тяги становилась ниже некоторого граничного значения, определяющего устойчивый режим проветривания. Для восточного крыла Северо-Муйского тоннеля граничное значение естественной тяги составляло 49 Па, а для западного крыла 22,5 Па. Количество воздуха, поступающее в выработки каждого крыла тоннеля, при этом было 16 $м^3/с$. В результате натурных измерений и расчетов было показано, что для проветривания выработок в переходные периоды целесообразно использовать вентиляторы местного проветривания, устанавливаемые в специально созданных перемычках в самом тоннеле и в пройденной параллельно ему разведочно-дренажной штольне. Полученные результаты получили положительную оценку Ростехнадзора России и были использованы для организации проветривания выработок Северо-Муйского тоннеля.