

УДК 622.451.012.2:621.63

**Бунько Т.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины),

**Жалилов А.Ш.**, магистр  
(ГП «Селидовуголь»),

**Кокоулин И.Е.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
СИСТЕМЫ «ВЕНТИЛЯТОРЫ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ –  
ШАХТНАЯ ВЕНТИЛЯЦИОННАЯ СЕТЬ» НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

**Бунько Т.В.**, д-р техн. наук, ст. науч. співр.  
(ИГТМ НАН України),

**Жалілов О.Ш.**, магістр  
(ДП «Селідовугілля»),

**Кокоулін І.Є.**, канд. техн. наук, ст. науч. співр.  
(ИГТМ НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ  
«ВЕНТИЛЯТОРИ ГОЛОВНОГО ПРОВІТРЮВАННЯ – ШАХТНА  
ВЕНТИЛЯЦІЙНА МЕРЕЖА» НА ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ**

**Bunko T.V.**, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine),

**Zhalilov A.Sh.**, M.S. (Tech.)  
(SC “Selidovugol”),

**Kokoulin I.Ye.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher  
(IGTM NAS of Ukraine)

**RESEARCH OF OPERATING PECULIARITIES OF THE SYSTEM «MAIN  
FANS - VENTILATION NETWORK» IN COAL MINES**

**Аннотация.** Обоснован переход от рассмотрения в отдельной постановке задач оптимизации аэродинамических параметров вентиляторов главного проветривания и шахтной вентиляционной сети к рассмотрению комплексной системы «вентиляторы главного проветривания - шахтная вентиляционная сеть». Охарактеризованы особенности такой комплексной системы и основные критерии оптимизации аэродинамических параметров вентиляторов главного проветривания и вентиляционной сети. Отмечено, что закон сопротивления отдельных элементов системы «вентиляторы главного проветривания - шахтная вентиляционная сеть» может быть отличным от квадратичного, что изменяет систему уравнений, описывающих законы Кирхгофа, и требует разработки новых методов расчета шахтной вентиляционной системы. Предложены критерии оценки структурной и параметрической взаимосвязанности вентиляторов главного проветривания, минимизация которых позволит перевести систему «вентиляторы главного проветривания – шахтная вентиляционная сеть» на близкое к секционному или полностью секционное проветривание. Изложение материала иллюстрируется примерами шахты «1/3 Новогородовская».

**Ключевые слова:** шахтные вентиляционные сети, вентиляторы главного проветривания, критерии, взаимосвязанность вентиляторов главного проветривания, разностепенной закон аэродинамического сопротивления.

В горнотехнической литературе отсутствует четкое разграничение понятий «вентиляционная система» и «вентиляционная сеть» шахты. Поэтому «расчет» и «управление» вентиляционной сетью или системой многими исследователями трактуются неправильно. Между тем вентиляционная система является более общим понятием, включающим в себя вентиляционную сеть (ШВС), как совокупность горных выработок, предназначенных для транспортировки воздуха, и утечек воздуха, и вентиляторы главного проветривания (ВГП), обеспечивающие эффективное функционирование ШВС. Методы расчета аэродинамических параметров элементов этих двух составляющих принципиально различны, и реализация задач расчета и управления ими в отдельной постановке не правомерна: как ШВС, так и ВГП не могут функционировать обособленно.

Конечно, на любой практически осуществимой напорной характеристике ВГП шахтная вентиляционная система функционировать будет, но об управлении ею речи быть не может – ведь имеет место взаимовлияние ШВС и ВГП. Неучет его повлечет к появлению серьезных расчетных ошибок, не говоря уже о неэффективности и неэкономичности работы ВГП. Поэтому задача расчета и управления вентиляционной системой должна решаться в совместной постановке для системы «вентиляторы главного проветривания – шахтная вентиляционная сеть». Только на такой основе могут быть установлены новые и уточнены существующие закономерности безопасной эксплуатации шахтных вентиляционных систем и работы ВГП на ШВС для разработки эффективных средств по снижению энергоемкости и повышению надежности проветривания шахт, обеспечивающих высокий уровень безопасности подземных горных работ. Такое представление поможет более эффективно решить ряд задач, которые не поддавались формализации и оптимизации для многовентиляторных шахтных вентиляционных систем, например, повышения эффективности функционирования шахтной вентиляционной системы с учетом внешних утечек воздуха через поверхностный комплекс вентиляционного ствола. Перед переходом к рассмотрению системы «ВГП-ШВС» следует учитывать, что установленные на шахтах ВГП удовлетворяют основным (стоимость и экономичность) и дополнительным (надежность, реверсируемость, адаптивность, компактность, управляемость и т.д.) критериям, удовлетворение которых было проверено на этапе проектирования ВГП и в рамках рассмотрения особенностей перехода к исследованию системы «ВГП-ШВС» изменяться не будут.

Математические модели как ШВС, так и ВГП известны и широко применяются научно-исследовательскими, проектными институтами, шахтами и подразделениями Государственной военизированной горноспасательной службы (ГВГСС) Украины при управлении вентиляционными системами угольных шахт. Существуют и ряд критериев эффективности их отдельной работы. Однако они не всегда применимы при оптимизационных расчетах системы «ВГП-

ШВС», поскольку такая система имеет ряд особенностей, основными из которых являются следующие.

1. Для одновентиляторных ШВС проблема совместной оптимизации подсистем ШВС и ВГП не ставится, поскольку их совместная работа и взаимовлияние не влияют на полученные оптимизационные результаты. В нормальном режиме проветривания изменение напора ВГП вызывает адекватную пропорциональную реакцию элементов ШВС, что позволяет с большой степенью точности прогнозировать поведение их и в дальнейшем. Термин «с большой степенью» употребляется из тех соображений, что существует и обратная связь: изменение депрессии элементов ШВС вызывает изменение характеристики ВГП, и полученные результаты будут несколько отличными от прогнозных. Однако для одновентиляторных ШВС такая неточность расчетов незначительна, и управление системой «ВГП-ШВС» может осуществляться просто путем включения ВГП в число элементов ШВС с соответствующими аэродинамическими характеристиками, после чего решение задач расчета и управления ШВС производится существующими методами. Аналогично обстоит дело и в случае использования реверсивного (при авариях) вентиляционного режима. Количество подаваемого в шахту воздуха при этом, естественно, уменьшится как за счет изменения аэродинамического сопротивления элементов ШВС, так и за счет изменения взаимовлияния тяги ВГП и ШВС в наклонных выработках (разумеется, с учетом требований [1] о максимально допустимом снижении подачи воздуха к объектам проветривания в реверсивном режиме), но это не повлияет на общую картину перераспределения воздушных потоков в шахте.

2. В случае многовентиляторной системы (такими являются практически все ВС шахт Минэнергоугля Украины) вентиляционная ситуация в шахте существенно меняется. Главной причиной этого является взаимовлияние ВГП. Оптимальным вариантом организации проветривания многовентиляторной ШВС была бы организация секционного проветривания, когда каждый вентилятор проветривал бы отдельную совокупность основных, дополнительных потребителей свежего воздуха и вспомогательных выработок. По такому пути идут шахты Кузнецкого угольного бассейна в Российской Федерации [2], (Мясников А.А., 1981), обладающие более сложными в плане размерности и количества задействованных ВГП вентиляционными системами. В Кузнецком бассейне такая особенность организации многовентиляторной ШВС учитывается уже на стадии проектирования, и в ходе эксплуатации ШВС лишь адаптируется к изменениям условий ведения очистных работ. На действующих шахтах Украины такой подход неприменим. Три, четыре и более ВГП имеют сильную связь на исходящей струе, и решение может быть найдено путем уменьшения этой связи изменением аэродинамическим параметров элементов ШВС, находящихся на границах зон взаимовлияния ВГП. Тем самым размерность зон взаимного влияния ВГП будет сокращена, что положительно скажется на повышении эффективности работы каждого ВГП в отдельности. Одной из важных задач является разработка соответствующего критерия.

Ряд вентиляционных систем современных шахт оснащены устаревшими

ВГП, требующими замены. Такая замена повлечет за собой изменение зон взаимного влияния ВГП в ШВС и корректировки методического обеспечения их актуализации.

Однако решение этой задачи также оказывается весьма затруднительным и неоднозначным. В общем виде она пока не решена, а попытки получить на отдельных шахтах решения, приближенные к секционному проветриванию, показали, что единого метода для этого, по-видимому, нет.

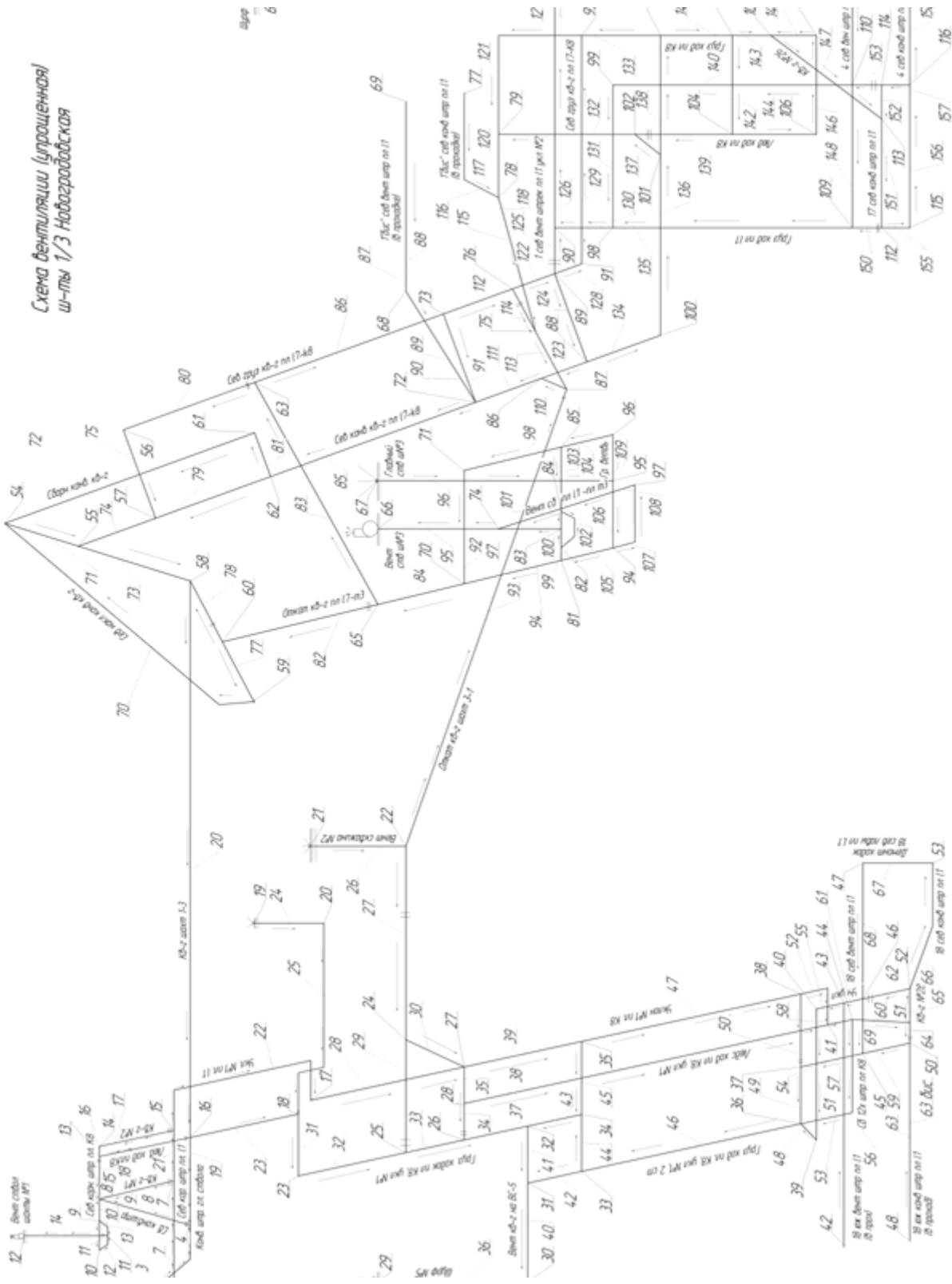
В работе [3] рассмотрена, в качестве примера многовентиляторной системы «ВГП - ШВС», вентиляционная система шахты «1/3 Новгородовская» ПО «Селидовуголь». При относительно невысокой топологической размерности ШВС шахта обслуживается четырьмя ВГП. Особенностью ее является то, что она объединяет ранее самостоятельные шахты № 1 и № 3, которые объединены только горными работами. В настоящее время, как и раньше, каждая шахта имеет свою промплощадку, на которой располагаются стволы, технологический комплекс по приему угля из шахты, его отгрузке, транспортировке породы на породные отвалы, необходимые вспомогательные здания, цеха и сооружения.

Упрощенная ШВС шахты «1/3 Новгородовская» приведена на рис. 1. Подробный анализ этой ШВС с целью выявления зон взаимного влияния ВГП и возможностей организации проветривания шахты, близкого к секционному, приведен в [3]. Основная нагрузка ложится на ВГП шурфа № 5, фактически обслуживающего всю объединенную ШВС. Зоны попарного влияния ВГП (а для ВГП шурфа № 5 – со всеми остальными ВГП) весьма значительны; они сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика областей взаимовлияния ВГП

Взаимовлияние ВГП	Зона взаимного влияния (номера ветвей)	Точки разделения вентиляционной струи (номера узлов)
ВС ш. №1 ↔ шурф № 5	1, 2, 4, 5, 6, 7, 19, 21	15, 16
ВС ш. № 3 ↔ шурф № 4	96, 104, 105, 106, 109	81, 85, 94
Шурф № 5 ↔ шурф № 4	83, 84, 86, 88, 92, 94, 96, 98, 101, 104, 109, 112, 122, 124, 134, 136, 141, 142	63, 65, 88, 103, 104
ВС ш. № 3 ↔ шурф № 5	96, 104, 105, 1056, 107, 109	81, 85

Оптимизация проветривания шахты может быть достигнута регулированием аэродинамических параметров ветвей-выработок ШВС, инцидентных узлам, номера которых перечислены в последней колонке таблицы 1. Задача эта весьма сложна, и даже не по причине большого количества оптимизационных расчетов (проблема размерности ШВС и соответственно, увеличения времени проведения расчетов практически снята значительным повышением быстродействия современных ПЭВМ), а связана с невозможностью эффективного использования установленных в указанных выработках или установки в них новых средств местного регулирования вентиляционных потоков по технологическим причинам.



Последнее вызывает необходимость поиска методов и средств регулирования количества воздуха в выработках, инцидентных выработкам границы зон взаимного влияния ВГП, что еще более усложняет задачу. Визуальное рассмотрение схемы рис. 1 подсказывает, на первый взгляд, оптимальное решение организации секционного проветривания шахты «1/3 Новогородовская». Квершлаг шахт 1-3 – фактически единственная выработка, соединяющая вентиляционные системы шахт № 1 и № 3 – является причиной распространения зоны проветривания ВГП шурфа № 5 на участки шахты № 3.

Регулирование расхода воздуха в нем позволило бы создать близкую к двум двухвентиляторным систему проветривания, а полное перекрытие сделало бы эту систему абсолютно секционной (откаточным квершлагом шахт 1-3, ввиду незначительного расхода воздуха, можно пренебречь). Однако проходка квершлага шахт 1-3 преследовала отнюдь не вентиляционные цели, и проведение общешахтных вентиляционных мероприятий в нем недопустимо.

3. Еще сложнее обстоит при осуществлении в шахте реверсивного аварийного вентиляционного режима. Если в случае одновентиляторного проветривания воздухораспределение не меняет своего качественного характера (меняется лишь направление движения и дебит воздуха во всех ветвях-выработках ШВС), то для многовентиляторных ШВС это неочевидно. Последнее плановое реверсирование вентиляции, произведенное на шахте «1/3 Новогородовская» в 2016 году, не выявило таких случаев, однако на некоторых шахтах они имеют место. Это меняет качественную картину проветривания, поскольку при возникновении шахтной аварии (что наиболее ясно видно на примере экзогенного пожара), для ликвидации которой и спасения находящихся в шахте людей собственно и используется установление нового вентиляционного режима, изменяется размерность и конфигурация подсхемы ШВС, загазированной продуктами горения. Учитывая возможность проявления в выработках с таким «неочевидным» движением воздушного потока, особенно находящихся на границе зон взаимного влияния ВГП, тепловой депрессии пожарного очага, значительно превышающей по своему значению обычную депрессию естественной тяги в них, решение задачи определения аэродинамических параметров элементов многовентиляторной ШВС в аварийных условиях усложняется.

4. В многовентиляторной ШВС имеется возможность, в отличие от одновентиляторной, осуществление, в качестве аварийного, комбинированного вентиляционного режима с переводом на реверс или остановкой нескольких ВГП. Нормативным документом [1] такие действия запрещены (кроме случаев, когда такой режим проветривания шахты является нормальным), однако в реальных условиях, при условии доказанности его эффективности, может быть разрешен к применению. В этом случае и так не инвариантные при изменении вентиляционного режима границы зон взаимного влияния ВГП еще более сместятся; ситуация может усугубиться непредсказуемым взаимовлиянием естественных тяг (или тепловых депрессий) в стволах или наклонных выработках.

5. В вентиляционных расчетах угольных шахт неизбежно присутствуют участки ШВС с неопределенными структурой и аэродинамическими парамет-

рами. Это могут быть как участки, полученные эквивалентированием более сложного участка более простому, определение аэродинамических параметров которого доступнее, либо участки, вообще реально в ШВС не определяемые (выработанные пространства и всякого рода утечки). Внутришахтные утечки воздуха колеблются от 22,7 до 66,2% объема от поступающего в шахту воздуха. Они способны оказать значительное влияние на аэродинамическое состояние ШВС. Если при одновентиляторном проветривании изменение их аэродинамических параметров является лишь качественным (влияние изменения режима работы ВГП на все участки одинаково, различие является исключительно количественным), то при многовентиляторном проветривании существующие методы учета особенностей этих участков могут сформировать модель ШВС, неадекватную реальной ВС шахты. Главной причиной такого положения является затруднительность определения характера закона сопротивления участков с неопределенной структурой и аэродинамическими параметрами. Для одновентиляторной сети это не имеет особого значения (просто будет несколько изменяться расчетное количество воздуха при неизменной структуре воздушных потоков в ШВС), то в многовентиляторной сети изменения даже в нормальном (не говоря уже об аварийных) вентиляционном режиме могут носить и качественный характер. Иными словами, уравнение второго закона Кирхгофа, в существующих методах расчета имеющее вид

$$H(i, j) = \sum_1^m R(i, j)Q^2(i, j) + H_g(i, j) + H_{есм}(i, j),$$

где  $H(i, j), R(i, j), Q(i, j), H_{есм}(i, j), H_g(i, j)$  – депрессия выработки-ветви  $(i, j)$ , входящей в рассматриваемый линейно независимый контур ШВС, ее аэродинамическое сопротивление, расход воздуха (направление его движения принимается от  $i$  к  $j$ ) и величина естественной тяги в ней (принимается с соответствующим знаком) и депрессия ВГП, входящего в состав контура;  $m$  – количество ветвей контура, должно быть заменено (особенно при расчете аварийных вентиляционных режимов) на

$$H(i, j) = \sum_1^m R(i, j)Q^n(i, j) + H_g(i, j) + H_{есм}(i, j) + H_{тепл}(i, j),$$

где  $H_{тепл}(i, j)$  – величина тепловой депрессии (с соответствующим знаком) в ветви-выработке, если она является вертикальной или наклонной и на ней сказывается температурное влияние пожарного очага,  $n$  – для каждой ветви-выработки контура свой показатель закона аэродинамического сопротивления.

Для реально существующих ветвей-выработок ШВС  $n=2$  (такое же значение принимается в существующих расчетных методах и для всех остальных элементов ШВС, что приводит к расчетным неточностям), для остальных элементов ШВС  $1 \leq n < 2$ . Фильтрационные процессы движения газозадушной смеси в выработанных пространствах в классической постановке двучленным законом

$H = RQ^2 + rQ$ , в котором преобладание той или иной составляющей изменяется в зависимости от местоположения исследуемого участка [4-5], (Андрияшев М.М., 1982), (Гращенко Н.Ф., 1988), (Христианович С.А., 1989). Определение границ таких участков и точных значений  $n$  для ряда элементов ШВС представляет затруднительно. В практических условиях, как показали исследования ИГТМ НАН Украины, достаточно принимать  $n=1$  для утечек воздуха и  $n=1,5 \div 1,7$  для участков, моделирующих выработанное пространство, в зависимости от их удаления от лавы. Даже такое приближенное представление значительно уточняет полученные расчетные результаты.

6. В реальных ШВС присутствуют утечки (подсосы) на ВГП, ухудшающие воздухообмен подземных выработок. Они регламентируются нормативными документами [1-2]. Для одновентиляторной сети учет их несложен: мощность вентилятора расходуется на выдачу поступающего из шахты воздуха плюс его подсосы извне вентиляционных сооружений. Если же шахта является многовентиляторной – величина внешних подсосов не всегда пропорциональна мощности ВГП; соответственно, меняется и обеспечиваемое им количество выдаваемого из шахты воздуха. Уменьшение или устранение внешних подсосов изменяет уровень его влияния на другие ВГП, конфигурацию зон их взаимного влияния, а значит – и аэрологическую ситуацию в шахте. Установление закономерностей возникновения, характер и дебит подсосов на ВГП повышают достоверность прогноза распределения шахтного воздуха по выработкам и, что особенно важно, дают возможность предварительного анализа воздухообмена при возникновении различных аварийных ситуаций.

7. Существующие в настоящее время и используемые в практике критерии оценки эффективности проветривания шахты делятся, ввиду различных подходов к оптимизации, на две группы: первая – для ВГП, вторая – для ШВС.

К первой группе относятся (выборочно):

а) утечки (подсосы) воздуха через вентиляционные сооружения. Их допустимые значения регламентируются нормативными документами [1-2] для каждого вида вентиляционных сооружений, что позволяет оценить состояние каждого из них сопоставлением фактических и нормативных величин потерь воздуха. Если удастся добиться более полного удовлетворения этого критерия – естественно, улучшится и качество проветривания шахты;

б) подача ВГП. При работе нескольких ВГП на общую ШВС их общая подача  $Q_{в.общ.} = \sum Q_v$ , где  $Q_v$  – подача одного из ВГП. Проектное значение  $Q_{в.общ.}$  может значительно отличаться от реального, снижение его, при условии выполнения остальных критериев, – основная задача оптимизации работы ВГП;

в) суммарное аэродинамическое сопротивление каналов ВГП  $\overline{R_k}$ ;

г) коэффициент относительной подачи ВГП;

д) удельные затраты электроэнергии на проветривание шахты

е) коэффициент полезного действия ШВС

Эти критерии универсальны, они могут использоваться как на одновентиляторных, так и на многовентиляторных шахтах. Для условий одновентиляторных



шахт используются также в ряде случаев более частные критерии (удельная подача ВГП, потребляемая мощность ВГП и др.), однако для многовентиляторных шахт они применимы лишь по отношению к каждому ВГП в отдельности.

Ко второй группе относятся (выборочно):

а) обеспеченность объектов проветривания  $(i,j)$  воздухом. Она характеризуется коэффициентом обеспеченности

$$k_{об}(i, j) = \frac{Q_{факт}(i, j)}{Q_{расч}(i, j)},$$

где  $Q_{факт}(i,j)$  – фактический расход воздуха на объекте проветривания;  $Q_{расч}(i,j)$  – расчетный расход.

По степени обеспеченности объекты проветривания можно разделить на:

- 1) не обеспеченные расчетным количеством воздуха  $k_{об} < 1,0$ ;
- 2) обеспеченные расчетным количеством воздуха  $1,0 \leq k_{об} \leq 1,2$ ;
- 3) обеспеченные излишним количеством воздуха  $k_{об} > 1,2$ .

Необеспеченность шахты расчетным количеством воздуха является нарушением требований [1]. Кроме того, по подаче фактического количества воздуха можно судить о возможности превышения допустимой концентрации газов в выработке;

б) фактическая обеспеченность шахты воздухом по газовому фактору;

в) скорость воздуха в выработке. От нее зависит концентрация метана  $c(i,j)$  в выработке;

г) газонасыщенность выработанного пространства;

д) загроуженность метаном исходящей струи выемочных участков;

е) устойчивость проветривания, характеризующаяся стабильностью поступления воздуха на объекты проветривания как по расходу воздуха, так и по направлению потоков;

ж) регулируемость вентиляционной сети определяет способность отдельных ее элементов изменять величину своих характеристик в результате дополнительных влияний, перераспределяющих воздух между отдельными объектами. Она характеризуется диапазоном увеличения дебита воздуха в усиливаемых ветвях за счет уменьшения его в эффективной области регулирования (20-50-кратного уменьшения аэродинамического сопротивления усиливаемой ветви при положительном способе регулирования и 10-20-кратного увеличения аэродинамического сопротивления - при отрицательном).

Показатель регулируемости для пары усиливаемых и ослабляемых ветвей-выработок определяется как

$$Z_c = m_n \frac{m_y - 1}{1 - m_{oc}},$$

где  $m_n = \frac{Q_{н.у}}{Q_{н.ос}}$  - коэффициент начального расхода воздуха регулируемых пото-

ков;  $Q_{н.у}$ ,  $Q_{н.ос}$  – начальные (до регулирования) расходы воздуха в усиливаемой и ослабляемой ветвях;  $m_y$ ,  $m_{ос}$  – коэффициенты расхода воздуха соответственно в усиливаемых и ослабляемых ветвях после регулирования относительно их начальных величин, т.е.  $m_y = \frac{Q_{из.у}}{Q_{н.у}}$ ;  $m_{ос} = \frac{Q_{из.ос}}{Q_{н.ос}}$ ;  $Q_{из.в}$ ,  $Q_{из.ос}$  – измененные расходы воздуха в усиливаемой и ослабляемых ветвях в процессе регулирования;

з) реверсиримость потоков, определяемая способностью потока изменять направление движения за счет ВГП в реверсивном режиме его работы при наличии естественной тяги и характеризуется максимальной депрессией, развиваемой на данную ветвь-выработку или участок ШВС вентилятором главного проветривания (критической депрессией);

и) обобщенная депрессия шахты;

и) загроуженность шахты воздухом или способность ШВС принять дополнительное количество воздуха при увеличении напора ВГП:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^m h_{\delta i}}{Q_u}.$$

Чем больше величина  $Z$ , тем менее эффективно регулирование подачи воздуха в шахту путем изменения режима работы ВГП. При больших значениях  $Z$  необходима реконструкция сети. Этот критерий, естественно, может быть применим и для одновентиляторных ШВС, но там проверка его очевидна: достаточно лишь для всех  $(i,j)$  проверить удовлетворение критерия в) второй группы.

Легко видеть, что критерии как первой, так и второй групп делятся на основные и второстепенные. Безусловно требующими выполнения, без которого работа шахты не может быть эффективной и безопасной, являются для первой группы критерии а),б),в), для второй – критерии а),д),е),з). После выполнения (а если возможно – то и снижения значения) основных критериев следует проверить выполнение дополнительных, и если их удовлетворение или улучшение не противоречит основным – цель оптимизации режимов работы ВГП и проветривания ШВС по газовому фактору и фактору безопасности работ достигнута. С учетом того, что объединить даже основные критерии каждой группы в один комплексный затруднительно, следовать такой схеме оптимизации представляется целесообразным. Кроме того, на конкретной шахте, в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий ведения горных работ, могут использоваться и другие, частные, критерии оптимизации.

Вопросы взаимовлияния ВГП не рассматриваются в учебниках по аэрологии [Ушаков К.З., 1987], [6] и не учитываются в нормативном документе, действующем в угольной отрасли [2]. Критериев оценки этого влияния в настоящее время нет. Поэтому, на наш взгляд, для многовентиляторных ШВС следует дополнительно использовать следующие дополнительные критерии:

а) топологическая взаимосвязанность ВГП на исходящей струе. Этот крите-

рий может быть уверенно отнесен к числу основных первой группы. Он может быть в соответствии с диаграммой Эйлера – Венна представлен в виде

$$\bar{U} = \bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j=1}^m \{ (U_i^e \cap U_j^e) \} \rightarrow \min.$$

где  $U_i^e$  - зона проветривания  $i$ -го ВГП.

Для шахты «1/3 Новогородовская» (зоны проветривания ее ВГП полностью приведены в работе [3]) критерий в порядке представления зон взаимного влияния ВГП в матрице представляет собой

$$\bar{U} = \{ (U_1^e \cap U_3^e) \cup (U_2^e \cap U_4^e) \cup (U_3^e \cap U_4^e) \cup (U_2^e \cap U_3^e) \} \rightarrow \min.$$

Очевидно, что  $\bar{U}=0$  соответствует отсутствию аэродинамической связи ВГП на исходящей струе, т.е. возможности организации аналога совокупности одно-вентиляторных систем, проветриваемых четырьмя рассматриваемыми вентиляторами. Однако никакими исключительно топологическими перестроениями невозможно обеспечить минимизацию указанного критерия, и необходимо рассматривать его во взаимосвязи с критерием

г) параметрической взаимосвязанности ВГП на исходящей струе. Он характеризует связь  $Q(i,j)$  в ветвях-выработках, инцидентных точкам разделения вентиляционной струи на границах зон взаимного влияния ВГП (последняя колонка табл. 1) со стороны исходящей струи воздуха. Собственно, сокращение величины зон  $U_i^e$  определяется соотношением депрессий указанных ветвей-выработок, а соотношение расходов воздуха является результатным параметром; просто соотношение расходов воздуха выглядит более наглядно.

Критерий параметрической взаимосвязанности ВГП выглядит следующим образом:

$$\bar{U}_{общ} = \sum_{(j,j_k) \in \bar{U}_{вых}} Q(j, j_k) \rightarrow \sum_{(j,j_k) \in \bar{U}_{вых}} \left\{ \min \sum_{\substack{(j,j_k) \in U_l^e \\ \sum_k Q(j,j_k) \leq \sum_m Q(j,j_m)}} Q(j, j_k) + \max \sum_{(j,j_m) \in U_p^e} Q(j, j_m) \right\},$$

где  $\bar{U}_{вых}$  - множество ветвей-выработок ШВС, инцидентных узлам границ зоны  $\bar{U}$  со стороны исходящей струи;  $l$  – номер ВГП с  $h_l = \min \{ h_p \}$ ;  $p$  – номера остальных ВГП.

В частных случаях, если рассматривается  $\bar{U}_{общ}$  для узлов границы зон взаимного влияния двух ВГП путем управления одним из них,  $\bar{U}_{общ}$  представляет

собой элемент приведенного выше критерия в фигурных скобках. Если для узла  $j$  существует только  $(j, j_k) \in U_l^e$  и  $(j, j_p) \in U_p^e$  -

$$\bar{U}_{общ} = \min Q(j, j_l) + \max Q(j, j_p) + \sum_s Q(j_s, j),$$

где  $s$  – начальные узлы ветвей-выработок, инцидентных узлу  $j$  со стороны входящей струи воздуха. В предельном случае, после  $Q(j, j_l)=0$ ,  $Q(j, j_l) = Q(j_k, j)$ , узел  $l$  входит в множество узлов  $s$  и

$$\bar{U}_{общ} = \max Q(j, j_p) + \sum_s Q(j_s, j).$$

Расчет значений критерия  $\bar{U}_{общ}$  производится в следующем порядке.

1. Выбирается, из практических соображений, ВГП с номером  $l$  и ветвь-выработка  $(j, j_k) \in U_l^e$ , и формируется  $\bar{U}_{вых}$  для узла  $j$ . Если в указанное множество входит только одна  $(j, j_k) \in U_l^e$  и одна  $(j, j_p) \in U_p^e$  - производится маневрирование  $l$ -тым ВГП по схеме  $Q(j, j_k) \rightarrow \min$ . При этом  $Q(j, j_p) \rightarrow \max$ . В случае недостижимости реализации этих условий взаимное влияние ВГП для узла  $j$  изменяется в сторону увеличения влияния  $p$ -го ВГП. Если же достижима ситуация  $Q(j, j_k) = Q(j_k, j)$  – в дальнейшем  $Q(j, j_k) = Q(j_k, j)$  и  $Q(j, j_k)$  исключается из зоны взаимного влияния  $l$ -го и  $p$ -го ВГП.

2. Производится анализ ШВС на изменения, которые повлекла реализация управления п. 1, корректируются зоны взаимного влияния ВГП и повторяются те же действия для узлов границы зоны взаимного влияния  $l$ -го и  $p$ -го ВГП, и выполняется действия п. 1.

3. По исчерпанию узлов границы зоны  $U_l^e \cap U_p^e$  производится аналогичное рассмотрение следующей зоны взаимного влияния ВГП, и так далее до их исчерпания. На любом этапе оптимизации вентиляционного режима процесс может быть приостановлен в случае, если не смогут быть выполнены граничные условия на аэродинамические характеристики системы «ВГП-ШВС».

4. В предельном случае (на современных сложных многовентиляторных шахтах, видимо, недостижимом) произойдет организация секционного проветривания (замена многовентиляторной системы совокупностью одновентиляторных) без изменения топологии ШВС. Однако и в этом случае не придется останавливаться на достигнутом, поскольку при изменении условий ведения горных работ инвариантность системы проветривания может нарушиться.

В процессе выполнения оптимизационных расчетов особое внимание следует обратить на возможное нарушение критериев ж) и и) второй группы.

Некоторая громоздкость процесса оптимизации, как показали исследования, компенсируется расчетными возможностями современных ПЭВМ и невысокой размерностью зон взаимного влияния ВГП, которая, в процессе проведения оптимизационных расчетов, имеет тенденцию к уменьшению.

В рассмотренном варианте критерия подразумевается на первом этапе управление ВГП с номером  $l$ , обеспечивающим меньшие значения  $Q(j, j_k) \in U_l^e$ . Для конкретной шахты оптимизация вентиляционного режима может начинаться и с других ветвей-выработок границы зон взаимного влияния ВГП; выбор их представляет собой отдельную задачу.

Использование критериев структурной и параметрической взаимосвязанности ВГП на исходящей струе в любом случае позволит частично решить задачу оптимизации системы «ВГП-ШВС» путем организации проветривания, приближенного к секционному. Направлением дальнейших исследований явится проведение на ряде шахт многовариантных оптимизационных расчетов воздухораспределения на ПЭВМ и корректировка, в соответствии с полученными результатами, методического обеспечения организации эффективного функционирования многовентиляторных систем «ВГП-ШВС».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10. – [Чинний від 2010-03-22] / Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. - Офіц. вид. - Київ: Мінвуглепром України, 2010. -432 с. (Нормативний документ Мінвуглепрому України).
2. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт: ДНАОТ 1.1.30-6.09.93 – [Чинний від 1993-12-20] / ред. кол.: С.В. Янко [и др.]. – Киев: Основа, 1994. – 311 с. (Нормативный документ Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда).
3. Жалилов, А.Ш. Анализ реконфигурируемой вентиляционной системы шахты «1/3 Новогродовская» с использованием теории многополюсных структур / А.Ш. Жалилов // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 127. – С. 98-114.
4. Шкундин, С.З. Расчет вентиляционных сетей угольных шахт методом междузловых депрессий / С.З. Шкундин, А.Л. Иванников, И.Н. Зинченко // Уголь. – 2009. - № 1. – С. 35-37.
5. Емелин, П.В. Исследования процессов фильтрации газов и самонагрева угля в выработанных пространствах добычных участков угольных шахт: дис....канд. техн. наук / П.В. Емелин. – Караганда, 1998. – 178 с.
6. Голинько, В.И. Вентиляция шахт и рудников: учебное пособие / В.И. Голинько, Я.Я. Лебедев, О.А. Муха. – Днепропетровск: НГУ, 2012. – 266 с.

#### REFERENCES

1. Ukraine Ministry of Coal Industry (2010), *NPAOP 10.0-1.01-10 Pravyla bezpeky u vugilnykh shakhtakh: Normatyvnyy document Minvuglepromu Ukrainy* [10.0-1.01-10 Rules of safety at coal mines: Regulatory Document of Coal Industry of Ukraine], Ukraine Ministry of Coal Industry, Kiev, Ukraine.
2. The State Committee for Occupational Safety of Ukraine (1994), *DNAOT 1.1.30-6.09.93 Rukovodstvo po proektirovaniyu ventilatsii ugolnykh shakht: Normatyvnyy document Gosudarstvennogo komiteta Ukrainy po nadzoru za okhranoy truda* [1.1.30-6.09.93 Guide on planning ventilation of coal mines: Regulatory Document of The State Committee for Occupational Safety of Ukraine], Osнова, Kiev, Ukraine.
3. Zhailov, A.Sh. (2015), “Analysis of the re-configuration ventilation system of mine “1/3 Novogrodovskaya” with the use of theory of multipolar structures”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 127, pp 98-114.
4. Shkundin, S.Z., Ivannikov, A.L. and Zinchenko, I.N. (2009), “Calculation of ventilation networks of coal mines by the method of between-knot depressions”, *Coal*, no. 1, pp. 35-37.
5. Yemelin, P.V. (1998), “Researches of processes filtration of gases and self-heating of coal in the worked out spaces of mining districts of coal mines”, Ph.D. Thesis, Karaganda, Kazakhstan.
6. Golinko, V.I., Lebedev, Ya.Ya. and Mukha, A.A. (2012), *Ventilyatsiya shakht i rudnikov: uchebnoe posobie* [Ventilation of pits and mines: educational manual], NMU, Dnepropetrovsk, Ukraine.

#### Об авторах

**Бунько Татьяна Викторовна**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах Института

геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [bunko2007@mail.ru](mailto:bunko2007@mail.ru).

**Жалилов Александр Шамильевич**, магистр, главный механик ГП «Селидовуголь», Селидово, Украина, [alnat01@mail.ru](mailto:alnat01@mail.ru).

**Жокоулин Иван Евгеньевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [bunko2007@mail.ru](mailto:bunko2007@mail.ru).

#### About the authors

**Bunko Tatyana Viktorovna**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, [bunko2007@mail.ru](mailto:bunko2007@mail.ru).

**Zhalilov Alexandr Shamilyevich**, Master of Science (M.S.), Chief mechanical engineer of the State Company "Selidovugol" (SC "Selidovugol"), Selidovo, Ukraine, [alnat01@mail.ru](mailto:alnat01@mail.ru).

**Kokoulin Ivan Yevgenyevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in the Department of Mineral Mining at Great Depths N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, [bunko2007@mail.ru](mailto:bunko2007@mail.ru).

**Анотація.** Обґрунтовано перехід від розгляду в роздільній постановці задач оптимізації аеродинамічних параметрів вентиляторів головного провітрювання і шахтної вентиляційної мережі до розгляду комплексної системи «вентилятори головного провітрювання - шахтна вентиляційна мережа». Охарактеризовано особливості такої комплексної системи і основні критерії оптимізації аеродинамічних параметрів вентиляторів головного провітрювання і вентиляційної мережі. Відзначено, що закон опору окремих елементів системи «вентилятори головного провітрювання - шахтна вентиляційна мережа» може бути відмінним від квадратичного, що змінює систему рівнянь, які описують закони Кирхгофа, і вимагає розробки нових методів розрахунку шахтної вентиляційної системи. Запропоновано критерії оцінки структурного і параметричного взаємозв'язку вентиляторів головного провітрювання, мінімізація яких дозволить перевести систему «вентилятори головного провітрювання – шахтна вентиляційна мережа» на близьке до секційного або повністю секційне провітрювання. Вклад матеріалу ілюструється прикладами шахти «1/3 Новогродівська».

**Ключові слова:** шахтні вентиляційні мережі, вентилятори головного провітрювання, критерії, взаємозв'язок вентиляторів головного провітрювання, неквадратичний закон аеродинамічного опору.

**Abstract.** The necessity to transit from considering optimization of aerodynamic parameters for the main fans and mine ventilation network as definition of separate problems to consideration of the complex system «main fans - mine ventilation network» is grounded. Specific features of such complex system and basic criteria of optimization of aerodynamic parameters for the main fans and ventilation network are described. It is stated that law of resistance of separate elements in the system «main fans - mine ventilation network» can differ from quadratic law, hence leading to the changed system of equations, which describe the Kyrkhgof laws, and necessity to develop new methods for calculating the mine ventilation systems. Criteria are also proposed for estimating structural and parametric interconnection between the main fans, satisfaction of which would allow to transfer the system «main fans - mine ventilation network» to maximally sectional or fully sectional ventilation. The text material is illustrated by examples from the 1/3 Novogradovskaya Mine.

**Keywords:** mine ventilation networks, main fans, criteria, interconnection between the main fans, nonquadratic law of aerodynamic resistance.

*Статья поступила в редакцию 11.11.2016*

*Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Софийским К.К.*