

*На правах рукописи*



СТАСЬ Виктор Павлович

**АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ВЛИЯЮЩИЕ  
НА СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ  
ОЧИСТНЫХ И ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ  
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Специальность 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород,  
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула, 2020

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) на кафедре геотехнологий и строительства подземных сооружений.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**КАЧУРИН Николай Михайлович.**

Официальные оппоненты:

**КОРШУНОВ Геннадий Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, профессор кафедры безопасности производств;

**ЛИСКОВА Мария Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), г. Пермь / доцент кафедры безопасность жизнедеятельности.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва.

Защита диссертации состоится «23» декабря 2020 г. в 14 час 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.271.04 при Тульском государственном университете по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 90, 6-й уч. корпус, ауд. 220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92, Ученый совет ТулГУ, факс: (4872) 35-81-81.

Автореферат разослан « 27» октября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Галина Викторовна  
Стась

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Вопросы безопасности являются важнейшим критерием эффективности процесса подземной угледобычи, причем вопрос аэрологической безопасности остается по-прежнему актуальным. Устойчивое обеспечение потребностей страны во всех видах топлива и энергии будет по-прежнему осуществляться за счет увеличения их добычи. В балансе топливно-энергетического комплекса доля использования угля занимает важное место, это положение сохранится и в перспективе, при этом около 50% угля планируется добывать подземным способом. Рост эффективности подземной добычи угля намечено осуществить путем ускоренного роста производительности труда. Достижение этой цели возможно лишь на основе внедрения высокоэффективных технологий нового уровня, что приведет к существенному повышению производительности очистных и подготовительных участков. В этих условиях особую актуальность приобретает проблема обеспечения безопасности горных работ по газовому фактору.

До настоящего времени причиной несчастных случаев, которые заканчиваются смертельно, является загазирование горных выработок. «Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах» нормируют газовый состав рудничной атмосферы – содержание кислорода, углекислого газа и прочих примесей шахтного воздуха. Однако для углекислотообильных шахт действующая редакция «Руководства по проектированию вентиляции угольных шахт» предусматривает прогноз только углекислотообильности горных выработок и только для нормального режима газовыделения.

Ретроспективный анализ фактической аварийности на углекислотообильных шахтах и шахтах 1-й и 2-й категории по метану показывает, что газовыделение из выработанных пространств является одной из основных причин несчастных случаев со смертельным исходом при нарушении состава рудничной атмосферы, вызванного снижением атмосферного давления воздуха. При этом главным фактором, обуславливающим летальные исходы, является снижение концентрации кислорода ниже 17%. Однако, как и в утратившей силу, так и в действующей редакции «Руководства по проектированию вентиляции угольных шахт» отсутствует методика расчета газовыделения из выработанных пространств, не предусмотрено определение количества воздуха по этому фактору в периоды экстренных газовыделений. Таким образом, задачу методического обеспечения проектирования проветривания по кислородному фактору для углекислотообильных шахт, и шахт 1-й и 2-й категории по метану нельзя считать завершенной.

Следовательно, изучение аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт для уточнения существующих теоретических положений, будет способствовать дальнейшему развитию этого перспективного научного направления в рудничной аэрологии. Особую актуальность эта проблема приобретает в условиях широкой компьютеризации всех звеньев экономики, позволяющей

автоматизировать сложные расчеты процессов динамики газообмена и формирования опасных газовых ситуаций в угольных шахтах.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии со стратегической программой Инжинирингового центра ТулГУ «Машины и оборудование для горнодобывающей отрасли», а также тематическими планами НИР Института горного дела и строительства ТулГУ.

**Целью работы** являлось уточнение закономерностей формирования аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт, для обеспечения аэрологической безопасности горных работ по кислородному фактору.

**Идея работы** заключается в том, что обеспечение аэрологической безопасности горных работ по кислородному фактору основывается на достоверных оценках и адекватных математических моделях низкотемпературного окисления углей и газообмена в горных выработках, вызывающих снижение концентрации кислорода в атмосфере очистных и подготовительных участков угольных шахт.

**Основные научные положения**, защищаемые автором, сформулированы следующим образом:

1. Динамика газообмена в горных выработках углекислотообильных шахт обусловлена физико-химическими процессами диффузии кислорода в уголь и фильтрацией газовой смеси из выработанных пространств при уменьшении статического давления. При этом средняя скорость поглощения кислорода пропорциональна произведению концентрации кислорода на глубину его проникновения в угольный пласт, а газовыделение из выработанных пространств пропорционально скорости уменьшения статического давления на контуре стока.

2. Формирование аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт, обусловлено технологическими воздействиями на угольные пласты, активизирующими низкотемпературное окисление угля и вытеснение кислорода из проветриваемых объемов при экстренных газовыделениях на углекислотообильных шахтах, и при интенсивном выделении метана на метанообильных шахтах.

3. Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания очистных и подготовительных участков по кислородному фактору, основывается на решениях стационарных уравнений конвективно-турбулентной диффузии, где в качестве источников газовыделения введены значения средней абсолютной газообильности, определяемые из решений дифференциальных уравнений параболического типа, а параметры математических моделей отражают физико-химические свойства вещества угля и газов, вытесняющих кислород из проветриваемых объемов.

4. В периоды экстренного выделения «мертвого воздуха» из выработанных пространств в углекислотообильных шахтах, обусловленного резким снижением статического давления воздуха в шахтах, происходит интенсивное обескислороживание атмосферы очистных и подготовительных участков, поэтому необходимо подавать дополнительное количество воздуха. Дополни-

тельное количество воздуха изменяется от 40 до 90 % и более от расчетного значения при стабильном статическом давлении воздуха на шахте.

**Новизна основных научных и практических результатов** заключается в следующем:

получены аналитические закономерности выделения мертвого воздуха из выработанного пространства, отличающиеся тем, что динамика газовыделений описывается с учетом вероятностного характера локального изменения атмосферного давления;

разработаны математические модели аэрогазодинамических процессов снижения концентрации кислорода в рудничной атмосфере и доказано, что процессы разбавления кислорода, как мертвым воздухом, так и метаном, вызывают наиболее резкие и наиболее глубокие снижения содержания кислорода в рудничной атмосфере, а также установлено, что физические причины экстренного выделения мертвого воздуха и метана различны, но аэрогазодинамические последствия по кислородному фактору единые – уменьшение концентрации кислорода в шахтном воздухе;

установлено, что наиболее активный газообмен происходит непосредственно в подготовительном забое, при этом динамика концентрации кислорода в подготовительных забоях обусловлена двумя газообменными процессами, во-первых – это разбавление и вытеснение кислорода из проветриваемого объема, и, во-вторых, поглощение кислорода обнаженными поверхностями угольного пласта;

усовершенствован метод динамического прогноза газовыделений, заключается в вычислении дебита углекислого газа и поглощения кислорода с учетом фактора времени на основе решений уравнений фильтрационно-диффузионного переноса газовых смесей в угольных пластах, выработанных пространствах и горных выработках.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что установленные закономерности газовыделений и снижения концентрации кислорода повышают достоверность прогноза газообильности выработок очистных участков углекислотообильных шахт и дают возможность предварительного анализа газовых ситуаций. Установленные зависимости позволяют оценить уровень технологических решений по фактору снижения содержания кислорода в шахтном воздухе. Разработанные пакеты прикладных программ для моделирования аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт, существенно облегчают решение задач газовой динамики.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

корректной постановкой задач исследований и квалифицированным применением классических методов математической физики, математической статистики и теории вероятностей и современных достижений вычислительной техники;

удовлетворительной сходимостью результатов прогноза с фактическими данными (отклонения не превышают 20%) и большим объемом вычислительных экспериментов;

положительными результатами промышленной апробации математического обеспечения задач прогноза газовыделений из выработанных пространств на углекислотообильных шахтах.

**Внедрение результатов исследований.** Основные научные и практические результаты диссертационной работы, реализованные в виде комплекса программных средств, использованы при ретроспективной оценке газовых ситуаций на шахтах АО «Мосбассуголь». Закономерности динамики газовыделения и рекомендации по повышению достоверности прогноза поглощения кислорода использованы в ТулГУ при выполнении договорных и госбюджетных НИР.

Теоретические положения и практические рекомендации прогноза газовыделений из выработанных пространств в периоды снижения атмосферного давления, изложенные в работе, используются в учебном курсе «Аэрология горных предприятий» для студентов ТулГУ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на научных семинарах кафедры геотехнологий и строительства подземных сооружений ТулГУ (г. Тула, 2015-2020 гг.); ежегодных научно – практических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 2015-2020 гг.); 4-й Международной конференции «Проблемы создания экологически чистых и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ископаемых и переработки отходов горного производства» (г. Тула, 2018 г.); Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула, 2015 – 2019 гг.); Международной конференции «Геомеханика. Механика подземных сооружений» (г. Тула, 2016 – 2018 гг.),

**Личный вклад заключается:** в математической обработке результатов лабораторных исследований, натурных наблюдений и вычислительных экспериментов; в разработке математических моделей аэрогазодинамических процессов для различных горно-геологических условий; в разработке алгоритмов для инженерных расчетов и прогнозных оценок.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 10 статей, в том числе 9 в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ; 1 статья опубликована в научном сборнике международной конференции.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из 4 глав, изложенных на 171 странице машинописного текста, содержит 37 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 165 наименований.

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору Е.И. Захарову и д.т.н., профессору Р.А. Ковалеву за методическую помощь и поддержку при проведении научных исследований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Фундаментальные и прикладные аспекты прогноза газовыделений на углекислотообильных шахтах разработаны Д.И. Коварским, А.А. Скочинским, Л.Н. Быковым и развиты в работах Э.М. Соколова, М.Б. Суллы, Г.Д. Лидина, Н.М. Качурина, Е.И. Захарова, А.А. Кузнецова, А.А. Мясникова, Н.С. Тищенко, Н.Г. Рыжиковой, А.Ф. Симанкина, Н.Г. Шилова, Р.А. Ковалева, Г.В. Стась, Г.И. Коршунова и других ученых. Анализ основных научных и практических результатов, полученных в различных научных школах, показал, что дальнейшее развитие аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт, требует дополнительных исследований по данной проблеме.

Современное состояние знаний по рассматриваемой проблеме, цель и идея работы обусловили необходимость постановки и решения следующих задач.

1. Проанализировать и обобщить технологические условия, влияющие на газообмен между поверхностью обнажения угольного пласта, выработанными пространствами и рудничным воздухом на очистных и подготовительных участках.

2. Уточнить математическую модель процесса фильтрационно-диффузионного переноса кислорода и мертвого воздуха через поверхность обнажения угольного массива и выработанных пространств в периоды снижения атмосферного давления.

3. Обобщить результаты экспериментальных исследований низкотемпературного окисления углей и оценить значения кинетических параметров взаимодействия углей с кислородом шахтной атмосферы.

4. Разработать математическую модель динамика концентрации кислорода в очистных и подготовительных забоях угольных шахт.

5. Уточнить математическую модель процесса конвективно-турбулентной диффузии газов в углекислотообильных и метанообильных шахтах, и разработать математическую модель разбавления кислорода и переноса газовых примесей в вентиляционном потоке горных выработок очистных и подготовительных участков.

6. Провести вычислительные эксперименты и усовершенствовать методику прогноза аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт для обеспечения аэрологической безопасности горных работ по кислородному фактору.

Анализ фактических газовых ситуаций показал, что на углекислотообильных шахтах снижение концентрации кислорода вызвано падениями атмосферного давления. Значения атмосферного давления являются случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения. Многочисленные газоздушные съемки показали, что изменение содержания кислорода и углекислого газа в активной зоне выработанного пространства имеет тесную статистическую связь с атмосферным давлением.

В результате анализа газовых проб, взятых из выработанного пространства лавы № 50 шахты «Щекинская», наглядно подтверждается, что состав газозудушной смеси зависит от атмосферного давления. Рассматривая изменение концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в течении 540 часов и сравнивая эти данные с колебаниями атмосферного давления, можно видеть всплески концентрации углекислого газа и снижение концентрации кислорода при уменьшении давления (рисунок 1).

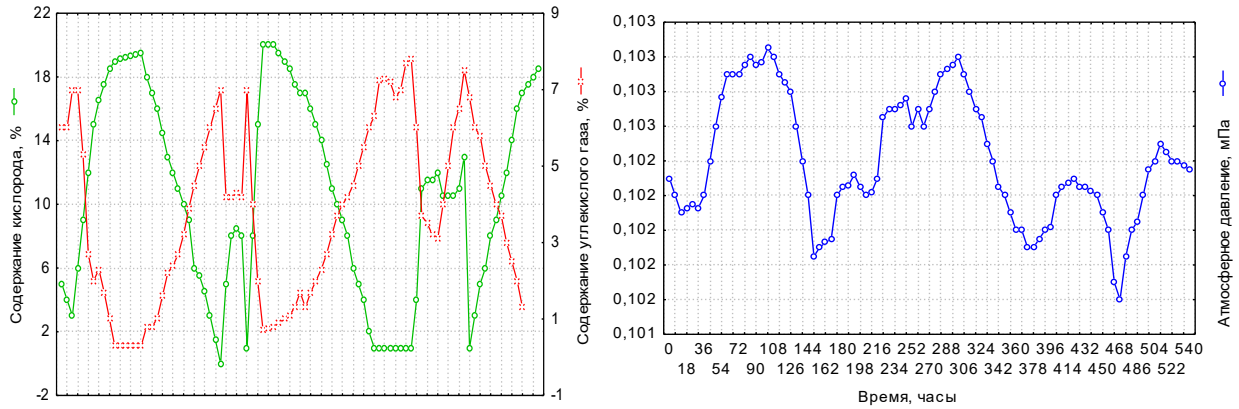


Рисунок 1–Изменение содержания  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  в активной зоне выработанного пространства. Шахта «Щекинская», тупик лавы № 50

На графиках (рисунки 2, 3) показана описательная статистическая обработка информации, представленной рисунке 1.

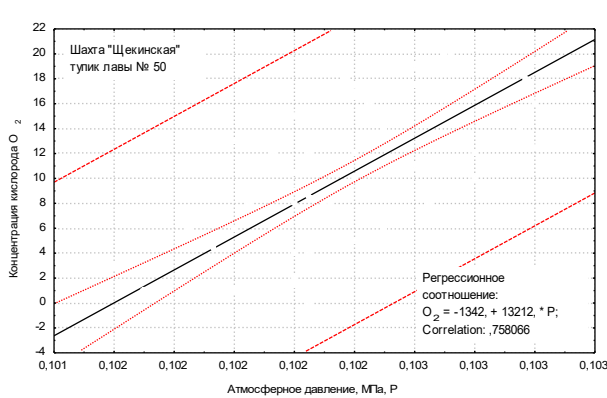


Рисунок 2 - Корреляция концентрации кислорода с атмосферным давлением

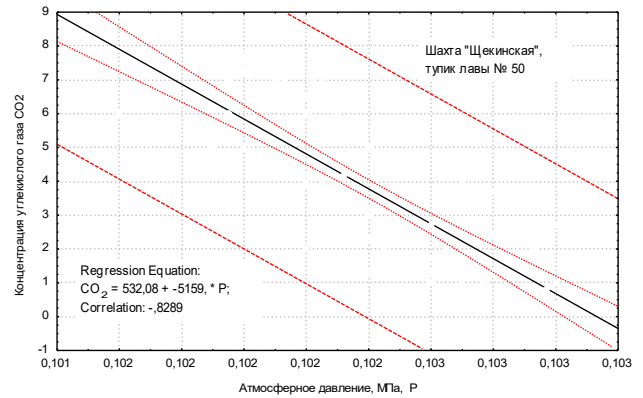


Рисунок 3 - Корреляция концентрации углекислого газа с атмосферным давлением

Как было установлено, кислород шахтного воздуха проникает в уголь и распространяется далее в пласте за счет кнудсеновской диффузии. Процесс движения кислорода в угольном пласте происходит одновременно с процессами сорбции и окисления углерода угля. Интенсивность поглощения кислорода углем в значительной мере определяется величиной его окислительной активности. Для развитой внутренней поверхности угля интенсивность поглощения кислорода будет равна  $K_O c_K$ , где  $K_O$  – константа скорости окисления угля;  $c_K$  – концентрация кислорода в угольном пласте. Удельная поверхность краевой

части угольных пластов Восточного Донбасса и Подмосковского угольного бассейна, полученная по методике Д. Козени для системы фильтрационных пор, изменяется от 40,6 до 114,6 м<sup>2</sup>/кг и в среднем составляет 63,1 м<sup>2</sup>/кг. Следовательно, можно обоснованно принять аналитическое выражение, описывающее интенсивность хемосорбции, в предлагаемом виде. Тогда математическое описание процесса поглощения кислорода может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{\partial c_K}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{j}_K) + K_O c_K = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{j}_K$  – поток Кнудсеновской диффузии кислорода в угольный пласт.

Диффузионный поток кислорода в угольный пласт можно представить, используя закон Фика, в виде:  $\mathbf{j}_K = -D_K \text{grad } c_K$ , где  $D_K$  – коэффициент кнудсеновской диффузии кислорода в угле.

В реальных горно-геологических условиях процесс Кнудсеновской диффузии кислорода в угольный пласт можно считать одномерным и протекающим в полубесконечном пространстве. Тогда математическую модель процесса можно записать в следующем образом:

$$\frac{\partial c_K}{\partial t} = D_K \frac{\partial^2 c_K}{\partial x^2} - K_O c_K, \quad (2)$$

$$c_K(x, 0) = 0, \quad c_K(0, t) = c_B, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} c_K \neq \infty, \quad (3)$$

Решение уравнения (2) для условий (3) получено в следующем виде:

$$c_K(x, t) = 0,5c_B \left\{ \exp \left[ -x(K_O D_K^{-1})^{0,5} \right] \text{erfc} \left[ 0,5x(D_K t)^{-0,5} - (K_O t)^{0,5} \right] + \exp \left[ x(K_O D_K^{-1})^{0,5} \right] \text{erfc} \left[ 0,5x(D_K t)^{-0,5} + (K_O t)^{0,5} \right] \right\}. \quad (4)$$

Вычислив производную функции (4) для  $x = 0$ , получим, что

$$I_{yд.к} = 0,113 D_K^{0,5} \left[ t^{-0,5} \exp(-K_O t) + K_O^{0,5} \text{erf} \sqrt{K_O t} \right], \quad (5)$$

где  $I_{yд.к}$  – объем кислорода, проникающего через единицу поверхности обнажения угольного пласта в единицу времени.

Динамика поглощения кислорода единичной площадью обнажения угольного пласта показывает, что скорость поглощения кислорода достаточно быстро стремится к асимптоте, поэтому в практических расчетах целесообразно использовать предельную величину  $I_{k\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} I_{yд.к}$ , которая определяется по формуле:

$$I_{K\infty} \approx 0,2 \Sigma F_O \sqrt{D_K K_O}, \quad (6)$$

где  $\Sigma F_O$  – фактическая суммарная площадь поверхности обнажения угольного пласта в рассматриваемой выработке.

Процессы вытеснения кислорода из атмосферы забоев горных выработок имеют место при экстренных газовыделениях, вызываемых резким снижением атмосферного давления. Математическое описание процесса формирования нестационарного поля давления для газовой смеси в зоне обрушения имеет вид:

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \kappa_g \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2}, \quad (7)$$

$$p(x, 0) = p_0 = \text{const}, \quad p(0, t) = \varphi(t), \quad \lim_{x \rightarrow \infty} p \neq \infty, \quad (8)$$

где  $p$  – давление мертвого воздуха в зоне обрушения;

$\kappa_g$  – коэффициент пьезопроводности зоны обрушения в выработанном пространстве;

$\varphi(t)$  – закон изменения атмосферного давления в рассматриваемый период времени.

Решение уравнения (7) для условий (6) можно записать в следующем виде:

$$p^2(x, t) = p_0^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{0,5x^2}{\sqrt{\kappa_g t}} \right) + \frac{0,5x^2}{\sqrt{\pi \kappa_g}} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{(t-\tau)^{1,5}} \exp \left[ -\frac{0,25x^2}{\kappa_g(t-\tau)} \right] d\tau. \quad (9)$$

Функция  $\varphi(\tau)$ , однозначно задается законом изменения статического давления в горных выработках. Дебит углекислого газа из выработанного пространства определяется в соответствии с законом Дарси по формуле:

$$I_{y.g.n}(t) = \frac{C_{y.g.n} h_0 L \kappa_g}{\mu \varphi(t)} \int_0^t \frac{\varphi(\tau)}{(t-\tau)^{1,5}} d\tau, \quad (10)$$

где  $C_{y.g.n}$  – концентрация углекислого газа в газовой смеси выработанного пространства;

$h_0, L$  – высота и длина поверхности контакта выработанного пространства с вентиляционной струей.

Процесс газовыделения из выработанных пространств при реверсировании ВГП в шахтах, проветриваемых нагнетательным способом описывают уравнением (7). Начальные и граничные условия при этом имеют следующий вид:  $p(x, 0) = p_0 = \text{const}$ ,  $p(0, t) = p_c = \text{const}$ ,  $\lim_{x \rightarrow \infty} p \neq \infty$ , где  $p_c$  – статическое

давление воздуха на контакте с выработанным пространством после изменения нагнетательного проветривания на всасывающий способ подачи воздуха в шахту. Решение уравнения (7) для этих условий получено в следующем виде:

$$\frac{p^2(x, t) - p_c^2}{p_0^2 - p_c^2} = \operatorname{erf} \left( \frac{0,5x}{\sqrt{\kappa_g t}} \right). \quad (11)$$

Тогда дебит углекислого газа из выработанного пространства при реверсировании ВГП в шахтах, проветриваемых нагнетательным способом, определяют в соответствии с законом Дарси по формуле:

$$I_p(t) = 0,564 C_{y.g.n} h_0 L k_{g.n} \mu^{-1} \frac{(p_0^2 - p_c^2)}{\sqrt{\kappa_g t}}, \quad (12)$$

где  $k_{g.n}$  – газовая проницаемость выработанного пространства.

Процессы вытеснения кислорода из атмосферы подготовительных забоев наблюдаются и при интенсивном выделении метана. Многочисленные газоздушные съемки показывают, что этот процесс очень напоминает процесс обескислороживания рудничного воздуха, обусловленный поглощением кислорода обнаженными поверхностями угольного пласта. Это сходство позволяет сравнить два физически различных процесса методом интегральной газовой динамики. В проветриваемом объеме  $\Omega$  за время  $dt$  концентрация кислорода изменится на величину  $dc_k$ , где  $c_k$  – концентрация кислорода в подготовительном забое, которая является функцией времени. Полагая, что изменением плотности газовых компонент воздуха можно пренебречь, получим следующее балансовое соотношение:  $\Omega dc_k = [Qc_0 - (Q + I_{cp})c_k] dt$ , где  $c_0$  – концентрация кислорода в свежей струе;  $Q$  – количество свежего воздуха, поступающего в проветриваемый объем;  $I_{cp}$  – среднее значение потока «мертвого» воздуха, выделяющегося в проветриваемый объем (или среднее метановыделение). Следовательно, математическая модель вытеснения кислорода из атмосферы объема  $\Omega$  будет иметь вид:  $dc_k/dt = 1/\Omega [Qc_0 - (Q + I_{cp})c_k]$ . Интегрируя это уравнение при начальном условии:  $c_k(0) = c_n = \text{const}$ , где  $c_n$  – начальная концентрация кислорода в подготовительном забое, получим,

$$c_k(t) = \frac{Qc_0}{Q + I_{cp}} - \left( \frac{Qc_0}{Q + I_{cp}} - c_n \right) \exp\left( -\frac{Q + I_{cp}}{\Omega} t \right). \quad (13)$$

Если рассмотреть кинетику поглощения кислорода поверхностью обнажения угольного пласта в объеме  $\Omega$ , то дифференциальное уравнение (13) примет следующий вид:  $dc_1/dt = 1/\Omega [Q(c_0 - c_1) - 0,2F_{об}\sqrt{D_K K_O}]$ , где  $c_1$  – концентрация кислорода в подготовительном забое, в котором происходит поглощение кислорода обнаженными поверхностями угольного пласта;  $F_{об}$  – площадь поверхности обнажения угольного пласта в подготовительном забое;  $D_K$  – коэффициент Кнудсеновской диффузии кислорода в угле;  $K_O$  – константа скорости низкотемпературного окисления угля. Решение этого уравнения имеет вид:

$$c_1(t) = c_0 - 0,2F_{об}\sqrt{D_K K_O}Q^{-1} - (c_0 - c_n - 0,2F_{об}\sqrt{D_K K_O}Q^{-1}) \exp(-Qt/\Omega). \quad (14)$$

Результаты расчетов представлены на рисунках 4 и 5, где  $c_n = c_0$ ;  $I_{cp} = \alpha Q$ ;  $\tau = (Q + I_{cp})\Omega^{-1}t$ ;  $C = c_k/c_0$ ;  $C_1 = c_1/c_0$ ;  $A = 0,2(Qc_0)^{-1}F_{об}\sqrt{D_K K_O}$ ;  $\tau_1 = Qt/\Omega$ .

Графики на рисунках 4 и 5 показывают наличие асимптот у  $C$  и  $C_1$ . Следовательно, можно записать:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_k = c_{k\infty} = Qc_0 / (Q + I_{cp}), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} C = C_\infty = (1 + \alpha)^{-1},$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_1 = c_{1\infty} = c_0 - 0,2Q^{-1}F_{об}\sqrt{D_K K_O}, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} C_1 = C_{1\infty} = 1 - A.$$

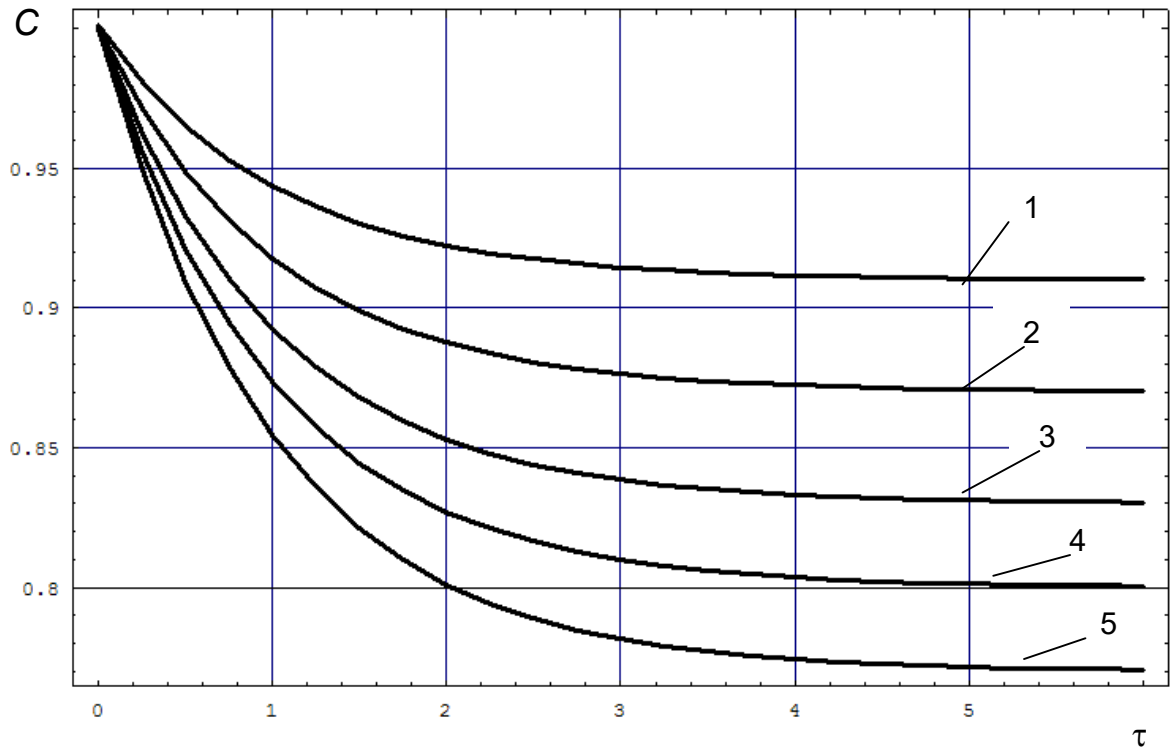


Рисунок 4 – График зависимости  $C$  от безразмерного времени  $\tau$  при значениях  $\alpha$  соответственно равных: 1 – 0,1; 2 – 0,15; 3 – 0,20; 4 – 0,25; 5 – 0,30

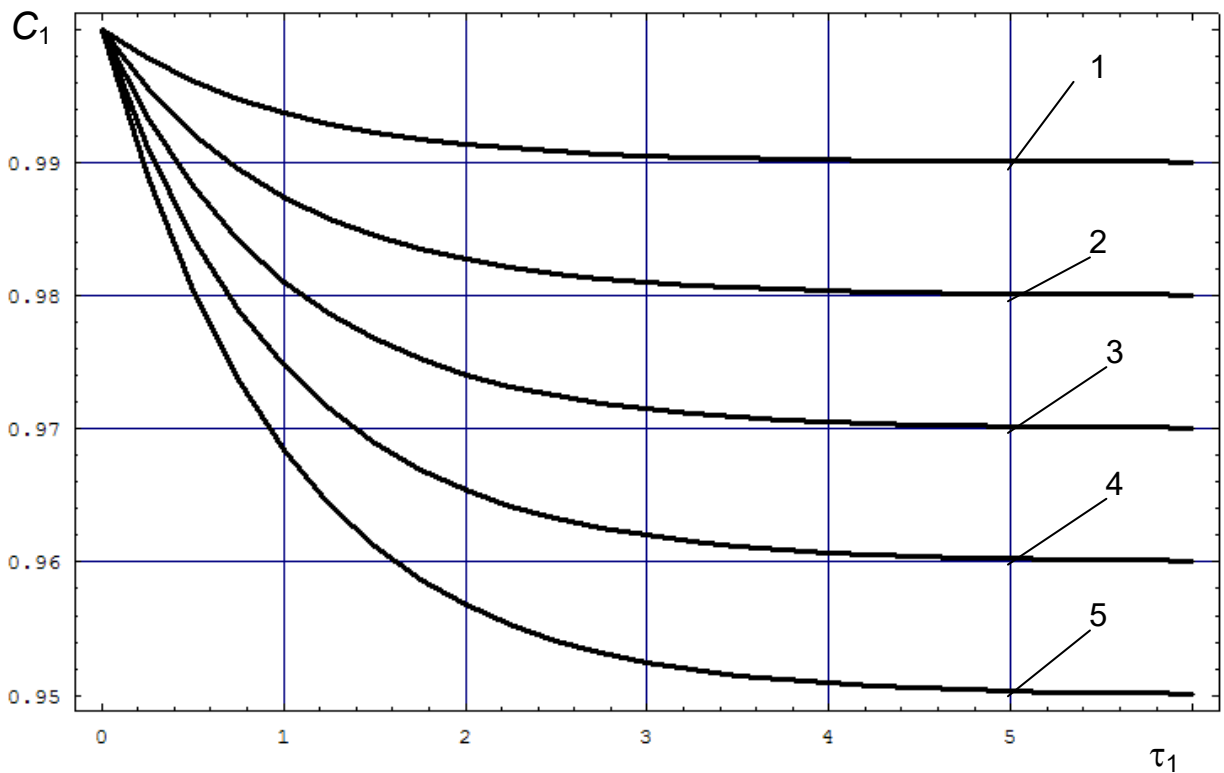


Рисунок 5 – График зависимости  $C_1$  от безразмерного времени  $\tau_1$  при значениях  $A$  соответственно равных: 1 – 0,01; 2 – 0,02; 3 – 0,03; 4 – 0,04; 5 – 0,05

Асимптотические значения концентраций кислорода показывают, на каком уровне стабилизируется содержание кислорода при его разбавлении другими газами и при поглощении кислорода углем. Сравнивая графики на рисунках 4 и 5, можно утверждать, что процесс разбавления кислорода другими газами приводит к более значительному уменьшению его содержания в воздухе подготовительного забоя, чем процесс поглощения углем.

Расчеты показывают, что в метанообильных подготовительных забоях количество воздуха по метановому фактору всегда больше количества воздуха, рассчитанного по кислородному фактору. Однако для углекислотообильных шахт, где в периоды экстренных газовыделений в подготовительный забой поступает большое количество мертвого воздуха, кислородный фактор является преобладающим. Полученные закономерности динамики концентрации кислорода в подготовительных забоях угольных шахт также целесообразно использовать при расследовании аварийных ситуаций.

Скорость газовыделения является базовой физической величиной для оценки газовых ситуаций при экстренных газовыделениях. Поэтому динамика газовыделения однозначно определяется величиной фильтрационного потока газовой смеси, вызванного снижением статического давления воздуха. Прогноз динамики фильтрационных потоков газовых смесей из выработанных пространств в горные выработки основывается на решении дифференциального уравнения в частных производных параболического типа для полуограниченного одномерного пространства, а также начальных и граничных условиях 1-го рода. Аналитическое решение одномерного уравнения нестационарной фильтрации газовой смеси можно получить только после его линеаризации, поэтому необходимо обосновать возможность использования линеаризованной математической модели фильтрации газовой смеси из выработанного пространства. В общем случае одномерное уравнение нестационарной изотермической фильтрации газовой смеси, начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \frac{k_{в.н} p}{\mu m} \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2}, \quad (15)$$

$$p(x, 0) = p_a, \quad p(0, t) = (p_a - at), \quad \lim_{x \rightarrow \infty} p \neq \infty, \quad (16)$$

Существуют различные способы линеаризации уравнения (15). К линейному уравнению параболического типа применим хорошо разработанный аппарат методов математической физики. После линеаризации уравнение (15) примет вид уравнения (7). Но в этом случае, решения уравнения (7) для условий (16) являются приближенными, так как они получены в результате интегрирования линеаризованного уравнения, а не точного. Вычислительные эксперименты позволили доказать, что линеаризованное уравнение позволяет сохранить требуемую точность расчетов.

Прогноз динамики концентрации кислорода в подготовительной выработке при падении атмосферного давления целесообразно осуществлять, используя решение уравнения конвективно-турбулентной диффузии для одномерного полубесконечного пространства:

$$c(x, t) = c_n \exp(-k_r t) + \left(1 - \frac{K_n}{k_r}\right) [1 - \exp(-k_r t)] + 0,5c_0 G(x, t) -$$

$$-c_n \int_0^t \exp[-k_r(t - \tau)] G(x, t) d\tau -$$

$$-\left(1 - \frac{K_n}{k_r}\right) \left\{ \int_0^t G(x, \tau) d\tau - \int_0^t \exp[-k_r(t - \tau)] G(x, t) d\tau \right\}, \quad (17)$$

где  $G(x, t) = \left\{ \exp(-xD_m^{-0,5}) \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{D_m t}} - \sqrt{(0,25D_m \omega^2 + \beta + K_n)t} \right] - \exp(xD_m^{-0,5}) \times \right.$

$$\left. \times \operatorname{erfc} \left[ 0,5x(D_m t)^{-0,5} + \sqrt{(0,25D_m \omega^2 + \beta + K_n)t} \right] \right\}; k_r = (Q + I_{cp}) \Omega^{-1} + K_n.$$

Условие аэрогазодинамической безопасности по фактору обескислороживания воздуха имеет следующий вид:  $c(L_{ПВ}, t) \leq 0,2$ . Следовательно, уравнение, описывающее динамику перемещения фронта загазирования в выработку, может быть представлено в следующем образом:

$$c_{св} \left[ G_1(x, t) - \int_0^t G_2(x, \tau) d\tau \right] = 0,2.$$

Исследование теоретических закономерностей может быть осуществлено в процессе вычислительных экспериментов с использованием стандартных пакетов прикладных программ. Расчеты количества воздуха для проветривания подготовительных выработок по фактору обескислороживания воздуха с использованием зависимости (17) представлены на рисунке 6.

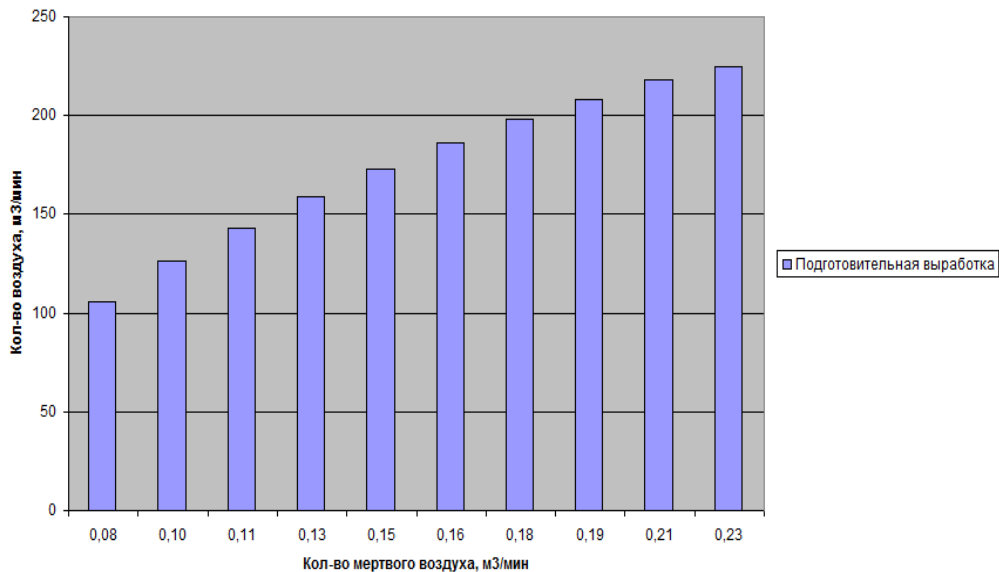


Рисунок 6 - Результаты расчета дополнительного количества воздуха для подготовительной выработки в периоды падения атмосферного давления

При вычислительном эксперименте использованы исходные данные по Подмосковному угольному бассейну. Таким образом, на основании выполненных теоретических и практических исследований уточнены закономерности продольного распределения минимальной концентрации кислорода в подготовительной выработке при падении атмосферного давления. Анализируя результаты вычислительных экспериментов, можно сделать вывод о том, что при падении атмосферного давления требуемое количество воздуха в атмосфере подготовительной выработки составляет от 230 до 420 м<sup>3</sup>/мин, то есть необходимо подавать в эти периоды дополнительное количество воздуха.

Интенсивность процессов проникновения кислорода в угольные пласты и его последующего переноса, сопровождающееся низкотемпературным воздействием с веществом угля, зависит, прежде всего, от величины коэффициента диффузии. Этот коэффициент является мерой диффузионного сопротивления угля, которое влияет на величину диффузионного потока. Анализ эмпирических закономерностей, отражающих связь коэффициента диффузии кислорода с факториальными признаками, во-первых, показал, что эта связь в большинстве случаев является нелинейной и, во-вторых, позволил выявить группу физико-химических свойств угля, которые являются наиболее значимыми факториальными признаками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе экспериментальных и теоретических исследований уточнены существующие закономерности формирования аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт, для обеспечения аэрологической безопасности горных работ по кислородному фактору, что позволяет точнее рассчитывать количество воздуха для проветривания очистных и подготовительных участков и повысить безопасность подземных горных работ.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Усовершенствована методика прогноза газовыделения из выработанных пространств очистных участков углекислотообильных шахт в периоды падения атмосферного давления, отличающаяся тем, что метеорологические воздействия на аэрогазодинамическую систему «вентиляционная струя – выработанное пространство», обусловленные атмосферными явлениями, моделируются на мезоуровне с использованием государственной системы метеорологического мониторинга.

2. Доказано, что повышение достоверности прогноза газообмена выработанных пространств с шахтной атмосферой в периоды падения атмосферного давления достигается за счет оценки средне-интегральных значений концентраций газовых компонент среды выработанных пространств по результатам моделирования динамики их газового состава.

3. Обоснована возможность моделирования локального изменения давления на контуре стока как случайного стационарного процесса, что повышает

достоверность решения задач прогноза выделения мертвого воздуха, а также установлено, что в периоды падения атмосферного давления наилучшая аппроксимация достигается линейной функцией (коэффициент корреляции, как правило, более 0,9).

4. Обосновано использование реляционной базы данных для текущей информации, получаемой в процессе мониторинга состояния атмосферы в приземном слое атмосферы, а также данных Тульского государственного университета по результатам шахтных наблюдений газовыделения при снижении статического давления воздуха. Доказано, что реализация общей концепции автоматизированной системы, обеспечивающей контроль величины давления на контуре стока, предусматривает использование оперативных оценок атмосферного давления по укрупненным показателям.

5. Установлено, что газообмен в горных выработках углекислотообильных шахт обусловлен физико-химическими процессами диффузии кислорода в уголь и фильтрацией газовой смеси из выработанных пространств при уменьшении статического давления. При этом средняя скорость поглощения кислорода пропорциональна произведению концентрации кислорода на глубину его проникновения в угольный пласт, а газовыделение из выработанных пространств пропорционально скорости уменьшения статического давления на контуре стока.

6. Формирование аэрогазодинамических процессов, влияющих на содержание кислорода в атмосфере очистных и подготовительных забоев угольных шахт, обусловлено технологическими воздействиями на угольные пласты, активизирующими низкотемпературное окисление угля и вытеснение кислорода из проветриваемых объемов при экстренных газовыделениях на углекислотообильных шахтах, и при интенсивном метановыделении на метанообильных шахтах.

7. Расчет количества воздуха, необходимого для проветривания очистных и подготовительных участков по кислородному фактору, основывается на решениях стационарных уравнений конвективно-турбулентной диффузии, где в качестве источников газовыделения введены значения средней абсолютной газообильности, определяемые из решений дифференциальных уравнений параболического типа, а параметры математических моделей отражают физико-химические свойства вещества угля и газов, вытесняющих кислород из проветриваемых объемов.

8. В периоды экстренного выделения «мертвого воздуха» из выработанных пространств в углекислотообильных шахтах, обусловленного резким снижением статического давления воздуха в шахтах, происходит интенсивное обескислороживание атмосферы очистных и подготовительных участков, поэтому необходимо подавать дополнительное количество воздуха. Дополнительное количество воздуха изменяется от 40 до 90 % и более от расчетного значения при стабильном статическом давлении воздуха на шахте.

**Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:**

1. Предельная загрязненность технологической воды при разработке россыпных месторождений золота / Н.М. Качурин, А.В. Волберг, А.Н. Качурин, В.П. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. Вып. 3. С. 209–216.
2. Аэрогазодинамические процессы и модели газовых ситуаций при проведении подготовительных выработок и строительстве тоннелей / Г.В. Стась, Апете Гоку Ландри, О.А. Афанасьев, В.П. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2017. Вып. 4. С. 354–363.
3. Аэродинамические режимы работы систем вентиляции подготовительных выработок / Н.М. Качурин, Г.В. Стась, А.Н. Качурин, В.П. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. Вып. 3. С. 85–94.
4. Стась Г.В., Качурин А.Н., Шкуратский Д.Н., Стась В.П. Фильтрационно-диффузионные процессы в угольных пластах, вмещающих породах и выработанных пространствах при подземной добыче угля // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. Вып. 4. С. 327–338.
5. Аэрогазодинамические процессы в горных выработках и обеспечение аэрологической безопасности при подземной добыче полезных ископаемых / Г.В. Стась, А.Н. Качурин, В.И. Голик, В.П. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2018. Вып. 4. С. 338–353.
6. Стась В.П. Динамика концентрации кислорода в атмосфере подготовительной выработки и очистного участка в период экстренных газовыделений // Сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч. конф. по проблемам рационального природопользования. 18 – 20 июня 2018 г.; под ред. М.В. Грязева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С.110–116.
7. Качурин А.Н., Афанасьев О.А., Стась В.П. Теоретические принципы обеспечения аэрологической безопасности подготовительных выработок // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 2. С. 350– 62.
8. Газовыделение с поверхности обнажения горных пород при проведении подготовительной выработки / Д.Р. Каплунов, А.Н. Качурин, О.А. Афанасьев, В.П. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. Вып. 4. С.239–249.
9. Качурин А.Н., Афанасьев О.А., Стась В.П. Динамика концентрации кислорода в подготовительных забоях угольных шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Вып. 1. С. 409–415.
10. Динамика кислородообмена на очистных и подготовительных участках углекислотообильных шахт / А.Н. Качурин, Г.В. Стась, С.Л. Сушков, В.П. Стась // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. Вып. 1. С. 415–422.

Изд. Лиц. ЛР №020300 от 12.02.97. Подписано в печать 19.10.2020

Формат бумаги 60x84. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 16. Тираж 100 экз. Заказ

Тульский государственный университет. 300012, г.Тула, пр. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, пр. Ленина, 95.