

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

На правах рукописи

АВЕРИН Геннадий Викторович

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

05.15.11 - "Физические
процессы горного производства"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Днепропетровск - 1994



Диссертация

Робота виконана в Государственном Макеевском научно-исследовательском институте по безопасности работ в горной промышленности и Институте геотехнической механики НАН Украины

НАУЧНИЙ КОНСУЛЬТАНТ:

докт. техн. наук, профессор

ЦЕПТИН
Врий Анатольевич

ОФИЦІАЛЬНІ ОПОНЕНТИ:

докт. техн. наук, профессор

КРЕМЕНЧУЦКИЙ
Николай Феофанович

докт. техн. наук, профессор

ПАК
Витольд Витольдович

докт. техн. наук, профессор

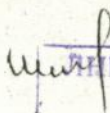
ШЕВЕЛЕВ
Гаррий Агапович

ВЕДУЧАЯ ОРГАНІЗАЦІЯ - Институт технической теплофизики НАН Украины (г. Киев).

Защита состоится " 18 " ноября 1994 г.
в 13⁰⁰ часов на заседании специализированного совета
Д 016.40.01 при Институте геотехнической механики НАН Украины
по адресу: 320600, г. Днепропетровск, ул. Симферопольская, 2а.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " 11 " октября 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
канд. техн. наук


ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Развитие добычи угля в Донецком бассейне может осуществляться, в основном, за счет освоения больших глубин. В настоящее время более 55 % шахт ведут горные работы на глубинах 600 - 1300 м. К 2000 году средняя глубина шахт возрастет до 800 - 915 м, а 25 % шахт будут работать на глубине более 1100 м. С увеличением глубины разработки растет газообильность шахт, возникают проблемы с проветриванием и обеспечением нормальных климатических условий в выработках. Поэтому возможности интенсификации горных работ и повышения безопасности труда во многих случаях ограничиваются в связи с аэродинамическими, тепловыми и газовыми проявлениями.

Термоаэрогазодинамические процессы в шахтах и рудниках чрезвычайно многообразны, однако они имеют единую физико-механическую основу ввиду тесной взаимосвязи между собой, что определяет единообразие математического моделирования их физической природы. Изучение данных процессов требует решения ряда сложных задач рудничной вентиляции, связанных с турбулентным переносом тепла, импульса и примесей в горных выработках. Следует отметить, что теория процессов переноса при турбулентном движении воздуха в выработках разработана весьма слабо, хотя теоретические методы анализа исключительно важны для многих задач рудничной вентиляции и горного дела. Большинство процессов переноса в шахтах связаны с решениями задач для общего уравнения диффузии. В области горной теплофизики это задачи прогноза тепловлажностных параметров воздуха и регулирования микроклимата в горных выработках, тепломассопереноса между породным массивом и различными жидкостями в процессах добычи нефти и газа, извлечения геотермальной энергии и разрушения горных пород. В области рудничной аэродинамики следует выделить задачи, связанные с изучением законов движения и определением основных характеристик воздушных потоков в горных выработках. Уравнение диффузии является определяющим в области газовой и пылевой динамики шахт при исследовании процессов переноса газообразных примесей и аэрозолей в горных выработках, диффузии газов в выработках при внезапных выбросах угля, порчи и газа, газовыделении от работающего оборудования и т. д.

Таким образом, проблема теоретического и экспериментального изучения процессов переноса для турбулентных течений рудничного воздуха является актуальной, так как это одна из основных проблем рудничной вентиляции. Она исключительно важна для развития методов

логии шахтной аэрологии и непосредственно связана с совершенствованием прогноза климатических условий и газообильности горных выработок, повышением эффективности и безопасности эксплуатации шахт. Методы исследования процессов турбулентного переноса могут также найти применение при решении широкого круга технических задач, выходящих за рамки рудничной аэрологии, так как турбулентность — это одна из самых больших проблем науки и техники.

Диссертационная работа содержит результаты исследований выполненных автором по тематическим планам научно-исследовательских работ МакНИИ и по своей направленности соответствует программе исследований по важнейшим фундаментальным проблемам НАН Украины и ГКНТ.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является установление закономерностей диффузии тепла, импульса и примесей при турбулентном течении рудничного воздуха для развития теории расчета процессов теплообмена и аэродинамики в горных выработках и повышение на этой основе эффективности и безопасности эксплуатации шахт.

ИДЕЯ РАБОТЫ состоит в теоретическом и экспериментальном обосновании взаимосвязи процессов переноса тепла, импульса и примесей в горных выработках и использовании единого подхода в расчетах процессов теплообмена и аэродинамики на основе аналитического решения дифференциальных уравнений переноса.

НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, РАЗРАБОТАННЫЕ ЛИЧНО СОИСКАТЕЛЕМ И ИХ НОВИЗНА

1. Метод решения краевых задач переноса, заключающийся в совместном применении интегрального преобразования Лапласа и квазиклассического приближения, получении асимптотического решения и составлении невязки между искомым решением и его асимптотикой в области оригиналов, позволивший впервые получить приближенные аналитические решения краевых задач теплообмена и гидродинамики при турбулентном движении среды в каналах и горных выработках и сформулировать методы анализа процессов турбулентного переноса.

2. Метод расчета коэффициентов турбулентной кинематической вязкости, теплопроводности и диффузии при движении воздуха в горных выработках, основанный на полученных теоретическим путем зависимостях этих характеристик от пути перемешивания и связи последнего с аэродинамическими и геометрическими параметрами и шероховатостью выработки. Метод позволил впервые получить количественные данные о структуре и характеристиках турбулентных потоков воздуха в горных выработках с различными видами шероховатости и крепи и сформулировать способы моделирования турбулентности в горных выработках.

3. Впервые экспериментально установленные закономерности и регрессионные зависимости совместного теплообмена и взаимосвязи процессов переноса тепла и водяного пара в горных выработках, позволившие сформулировать новые методические подходы в описании физики процессов теплообмена в выработках.

4. Общая теория и методы расчета процессов переноса тепла, импульса и пассивных примесей, позволяющие развить методологию шахтной аэродинамики и теплопереноса и впервые сформулировать единый подход к расчету процессов переноса при турбулентном движении воздуха в горных выработках.

5. Закономерности диффузии тепла, импульса и примесей и аналогии между процессами теплопереноса и аэродинамики при турбулентном движении воздуха в горных выработках, полученные впервые теоретическим путем на основе анализа решений дифференциальных уравнений переноса и сопоставлении результатов с экспериментальными данными, позволившие сформулировать комплекс практических методов расчета параметров, характеризующих теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление горных выработок, и получить прикладные зависимости для их определения.

6. Методы прогноза тепловлажностных параметров воздуха в горных выработках, отличающиеся использованием алгоритмов имитационного моделирования и экспериментально установленных закономерностей, характеризующих процессы теплообмена между рудничным воздухом и горным массивом. Методы являются научной основой для разработки новых методик прогноза климатических условий и определения параметров средств нормализации тепловых условий в шахтах.

ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИИ подтверждается комплексностью проведенных исследований, включающих применение фундаментальных положений теории теплопереноса и гидродинамики, использованием апробированных методов статистической обработки данных и математического моделирования сложных систем, представительностью шахтных экспериментальных данных, адекватностью разработанных моделей и зависимостей, статистической совместностью результатов моделирования физических процессов с шахтными экспериментальными данными, удовлетворительным совпадением расчетных данных с результатами исследований других авторов и многочисленными сопоставлениями результатов расчета с экспериментальными данными характеризующими процессы теплообмена и гидродинамики при турбулентном движении сред как в каналах, так и

в горных выработках (погрешность не превышала 10-15 % при уровне достоверности 0.95).

ЗНАЧЕНИЕ РАБОТЫ. Научное значение работы состоит в разработке общей теории и методов расчета процессов переноса при турбулентном движении рудничного воздуха, установлении закономерностей, характеризующих взаимосвязь процессов переноса тепла, импульса и примесей в горных выработках, разработке приближенного аналитического метода интегрирования дифференциальных уравнений переноса и получении на его основе решений основных задач конвективного теплообмена и аэродинамики, установлении закономерностей диффузии тепла, импульса и примесей в горных выработках, позволяющих развить общие научные представления о природе и особенностях турбулентных течений рудничного воздуха и сформулировать комплекс теоретических методов анализа процессов переноса в рудничной аэрологии.

Практическое значение работы заключается в разработке на базе новых теоретических положений комплекса практических методов расчета параметров, характеризующих теплообмен и аэродинамическое сопротивление горных выработок, моделей расчета диффузии тепла, импульса и примесей в выработках; методик определения характеристик турбулентных потоков рудничного воздуха, зависимостей, характеризующих аналогии между процессами переноса в шахтах, пакетов прикладных программ для реализации предложенных методов расчета. Результаты исследований положены в основу методов прогноза климатических условий и определения параметров средств нормализации тепловых условий в шахтах, а также нашли применение при создании новых средств охлаждения рудничного воздуха.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Метод прогноза климатических условий включен в " Экспресс-методику прогнозирования температуры воздуха в выработках глубоких шахт Донбасса ", которая используется глубокими шахтами для прогноза тепловых условий в горных выработках. Результаты работы явились основой для создания параметрического ряда шахтных передвижных кондиционеров, в частности, при разработке технических заданий и создании холодильных машин для охлаждения рудничного воздуха 20КПШ-115 и КПШ-130-2-0, при разработке технических заданий на машины КПШ-110-2-0 и ТКПШ-230-2-0, а также при создании систем охлаждения воздуха в подготовительных выработках глубоких шахт. Шахтная холодильная машина 20КПШ-115 серийно выпускается АНПО "Одесхолод" с 1968 г. В настоящее время АНПО "Одесхолод" изготовлен опытный образец холодильной машины КПШ-130-2-0 и ее приемочные ис-

питания завершаются МакНИИ на шахте им. А.А.Скочинского ПО "Донецк-уголь". Серийный выпуск машины планируется с 1995 г. На основе разработанного технического задания ведутся работы по созданию машины для охлаждения и осушения шахтного воздуха с турбокомпрессором ТКПМ-230-2-0. Серийный выпуск машины планируется АНПО "Одесхолд" с 1995-1996 г. Для нормализации тепловых условий в подготовительных выработках разработаны системы охлаждения шахтного воздуха в основу которых положено использование созданной холодильной техники. Вариант системы охлаждения реализован и внедрен на шахте им. В.М. Бажанова ПО "Макеевуголь". Предложенные системы охлаждения позволяют создать нормальные климатические условия в горных выработках, проводимых на глубоких горизонтах.

На основе выполненных исследований опубликована монография "Теоретические основы переноса импульса, тепла, и примеси в горных выработках", где изложены основные результаты данной работы.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на республиканской конференции "Проблемы совершенствования пылегазового режима на угольных шахтах" (г. Макеевка, 1988 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Интенсивная и безотходная технология разработки угольных и сланцевых месторождений" (г. Москва, 1989 г.), на 24-й международной конференции научно-исследовательских институтов по безопасности работ в горной промышленности (г. Донецк, 1991 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции "Холод - народному хозяйству" (г. Санкт-Петербург, 1991 г.), на 2-м международном форуме по тепло- и массообмену (г. Минск, 1992 г.), на сессиях Всесоюзного научного семинара по горной теплофизике, проводимых в 1985 - 1993 г., и других конференциях и семинарах, на ученых советах МакНИИ и ИГТМ НАН Украины.

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам исследований опубликовано 27 печатных работ и одна монография.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, 7 глав и заключения, содержит 309 страниц машинописного текста, включая 64 рис., 18 таблиц и список литературы на 248 наименований. Приложения на 159 страницах представлены в виде отдельного тома.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В настоящее время достаточно полно изучены процессы тепло- и

массопереноса и гидродинамики при турбулентном движении воздуха в гладких и шероховатых трубах. Турбулентные характеристики потоков исследовались Рейнольдсом, Прандтлем, Лаундером, Райхардтом, Дейслером, Колмогоровым, Сполдингом, Кутателадзе и многими другими авторами. Полученные в работах этих авторов закономерности обладают большой теоретической ценностью, однако они не могут быть распространены на турбулентные потоки в горных выработках, так как природа и закономерности турбулентных течений рудничного воздуха изучены еще недостаточно. Теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении проводились А.А.Скочинским, П.И.Вороновым, В.Н.Ворониным, К.З.Ушаковым, Ф.С.Клебановым, Ф.А.Абрамовым, Г.А.Шевелевым, А.Н.Щербанем, Н.Ф.Кременчуцким, В.В.Паком и другими авторами. Полученные ими данные свидетельствуют о сильном и достаточно сложном влиянии шероховатости выработок, а также различных природных и технологических особенностей на теплообмен и турбулентное течение воздуха в горных выработках. В числе экспериментальных данных по конвективному теплообмену и аэродинамике в шахтах в основном приводятся значения коэффициентов сопротивления и теплоотдачи. Практически отсутствуют данные по характеру профилей скорости, температур и примеси, а также по характеристикам турбулентности в условиях горных выработок. Недостаточно изучена структура воздушных потоков и механизм переноса тепла, импульса и примесей в выработках, а также закономерности и особенности протекания процессов теплообмена и аэродинамики в горных выработках.

На основе всего вышесказанного для достижения цели исследования в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Разработать приближенный метод и методику решения краевых задач теплообмена и аэродинамики при турбулентном движении воздуха в каналах и горных выработках и получить решения основных краевых задач переноса.
2. Установить закономерности диффузии тепла, импульса и примесей при турбулентном движении среды в каналах и горных выработках и разработать соответствующие математические модели.
3. Определить аэродинамические и теплообменные параметры, характеризующие процессы переноса при турбулентном движении воздуха в горных выработках.
4. Исследовать особенности турбулентных течений воздуха и установить закономерности совместного теплообмена, и взаимосвязи процессов переноса тепла, импульса и примесей в горных выработках.

5. Разработать общую теорию и методы расчета процессов переноса при турбулентном движении рудничного воздуха.

6. Сформулировать комплекс практических методов расчета параметров, определяющих тепломассоотдачу и аэродинамическое сопротивление горных выработок, зависимостей, характеризующих диффузию тепла, импульса и примесей в них.

7. Разработать теорию совместного тепломассопереноса при взаимодействии рудничного воздуха с горным массивом, методы прогноза климатических условий в горных выработках и создать новые средства нормализации тепловых условий в шахтах.

При разработке теоретических методов описания процессов диффузии в горных выработках возникает достаточно серьезные проблемы, заключающиеся в следующем. Во-первых, процессы турбулентного тепло-массообмена и аэродинамики описываются сложными дифференциальными уравнениями в частных производных. Во-вторых, в случае турбулентного движения возникает трудности в определении параметров турбулентного переноса тепла, импульса и примеси. В настоящее время при решении задач в области аэрокосмической техники, энергетики, физики атмосферы для расчетов процессов турбулентного переноса широко применяются теоретические модели, численное решение которых позволяет определять тепломассообменные и гидравлические характеристики достаточно сложных поверхностей и оребренных каналов без проведения трудоемких экспериментов. В рудничной аэрологии такой подход не получил распространения, несмотря на его исключительную продуктивность. К настоящему времени для условий горных выработок не определены такие турбулентные характеристики как путь перемешивания, коэффициенты турбулентной кинематической вязкости, теплопроводности и диффузии и др., что не позволяет получать решения модельных краевых задач переноса, являющихся основой для решения более сложных теоретических моделей, характеризующих диффузию активных примесей, условия формирования слоистых скоплений метана и др.

Обзор, предложенных различными авторами, методов расчета тепломассопереноса и турбулентного движения применительно к потокам жидкости в каналах показал, что основу этих методов составляет система уравнений диффузии, дополненная той или иной моделью турбулентного переноса тепла, импульса и примеси. Соответствующие дифференциальные уравнения, описывающие процессы переноса, подобны между собой, т.к. описание этих процессов связано с краевыми задачами для общего уравнения диффузии, в связи с чем при их изучении использу-

ются идентичные методы анализа. Изучение опубликованных работ показало, что в настоящее время не существует аналитических методов решения краевых задач переноса при турбулентном движении среды в каналах и горных выработках, т.к. эти задачи решаются преимущественно численными методами. Различными авторами предложено большое количество моделей турбулентности при движении сред в каналах. Для гладких каналов наиболее известны модели Мартинелли, Сполдинга, Райхардта и др., для шероховатых каналов следует отметить модели предложенные Ротта, Себесси и Ченгом, Миллиончиковым и др. Анализ работ данных авторов показывает, что модели турбулентного переноса всех уровней сложности, применяемые для расчета течений в каналах, являются полумпирическими, так как содержат константы, подбираемые по экспериментальным данным. Для шероховатых каналов, учитывая индивидуальный характер шероховатости, ее неоднородность и случайность, для практических расчетов не могут быть получены универсальные зависимости как для гладких труб и в каждом конкретном случае результаты расчетов необходимо сравнивать с опытными данными по переносу импульса, тепла и примеси. Экспериментальные данные по гладким и шероховатым каналам позволяют обосновать подходы при задании функций переноса в горных выработках. При этом, учитывая зависимость процессов переноса от шероховатости выработки, горнотехнических и горногеологических факторов, параметры функций переноса также должны подбираться по экспериментальным данным.

На основе обобщения многочисленных результатов теоретических и экспериментальных исследований сформулированы математические модели, характеризующие процессы турбулентного теплообмена и гидродинамики и показано, что краевые задачи переноса в гладких и шероховатых каналах и горных выработках отличаются только заданием параметров турбулентного переноса. При этом закономерности протекания процессов теплообмена и турбулентного течения существенно усложняются для случая движения среды в горных выработках, отличающихся наличием случайной или регулярной шероховатости. Поэтому из-за ограниченных возможностей экспериментальных исследований процессов теплообмена и турбулентного течения воздуха в горных выработках все более важными становятся исследования расчетно-теоретического характера с целью объяснения особенностей конвективного теплообмена и аэродинамики и для получения недостающей качественной и количественной информации.

Теоретические исследования процессов переноса теплоты и веще-

ства связаны с решением краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа:

$$\xi \omega(\xi) \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1 + f(\xi)) \xi^n \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) + \psi(\xi, \eta) \quad (1)$$

с соответствующими граничными условиями, причем $n = 0$ - для плоского канала и $n = 1$ - для цилиндрического канала.

Как известно, точное аналитическое решение соответствующей краевой задачи в большинстве случаев получить просто невозможно, в связи с чем для решения используют приближенные методы.

Разработка приближенного метода и методики решения краевых задач переноса при турбулентном движении воздуха основывалась на предварительном анализе решения задачи в области изображения по Лапласу и асимптотическом разложении изображения при больших значениях параметра преобразования P . После перехода в область оригинала находится распределение потенциала $\theta_0(\xi, \eta)$ для начальной стадии процесса теплопереноса. Для получения асимптотики решения (1) в области изображений в данном случае используется метод квазиклассического приближения. Данный метод применялся при решении краевых задач теплопереноса и аэродинамики при турбулентном течении среды в каналах и горных выработках. В общем случае решение представлялось в виде:

$$\theta(\xi, \eta) = Z(\xi, \eta) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \Psi_n(\xi) \exp(-P_n^2 \frac{\eta}{Pe}), \quad (2)$$

где $\Psi_n(\xi)$ - собственные функции, P_n - собственные значения, A_n - постоянные. Собственные значения и постоянные в решении (2) определялись путем минимизации невязки из условия равенства функций $\theta(\xi, \eta)$ и $\theta_0(\xi, \eta)$ при $\eta = 0$ и малых значениях η , т.е.

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0(\xi, 0); \quad \lim_{\eta \rightarrow 0} [\theta(\xi, \eta) - \theta_0(\xi, \eta)] = 0, \quad (3)$$

где δ - малое число. В качестве собственных функций $\Psi_n(\xi)$ принимались их асимптотические приближения из решения $\theta_0(\xi, \eta)$, которые представляют собой ортогональную систему функций.

Для примера, используя данный метод, решим краевую задачу тепло- и массопереноса в круглой трубе при граничном условии

первого рода и постоянной скорости потока в канале. В этом случае, если рассматривается процесс теплопереноса

$$\theta(\xi, \eta) = \frac{t - t_{cr}}{t_0 - t_{cr}}; \quad w(\xi) = Pe; \quad f(\xi) = \frac{\lambda_T(\xi)}{\lambda},$$

а если рассматривается процесс массопереноса

$$\theta(\xi, \eta) = \frac{C - C_{cr}}{C_0 - C_{cr}}; \quad w(\xi) = Pe_D; \quad f(\xi) = \frac{D_T(\xi)}{D}$$

Граничные условия имеет вид

$$\theta(\xi, 0) = 1; \quad \left. \frac{\partial \theta(\xi, \eta)}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0; \quad \theta(1, \eta) = 0 \quad (4)$$

Здесь t - температура; C - концентрация; λ - коэффициент теплопроводности; D - коэффициент диффузии; Pe, Pe_D - числа Пекле. Используемые индексы имеют следующее значение: 0 - начальное значение; ср - среднее значение; ст - стенка; т - турбулентность.

Применяя к системе (1) и (4) преобразование Лапласа по продольной координате η получим

$$\frac{d}{d\xi} \left((1 + f(\xi)) \xi \frac{dT}{d\xi} \right) - Pe \xi \left(T - \frac{1}{P} \right) = 0 \quad (5)$$

Асимптотическое решение уравнения (5) в области изображений при $P \rightarrow \infty, 0 < \xi \leq 1$, удовлетворяющее граничным условиям (4) и полученное методом квазиклассического приближения, имеет вид:

$$T - \frac{1}{P} = \frac{F^{Pe}(\xi)}{\sqrt{\xi} (1+f(\xi))^{Pe}} \frac{I_0(F(\xi) \sqrt{Pe P})}{\sqrt{m} I_0(m \sqrt{Pe P})}, \quad F(\xi) = \int_0^\xi \frac{dt}{\sqrt{1+f(t)}} \quad (6)$$

Оригинал изображения (6) представляется следующим образом:

$$\theta_0(\xi, \eta) = 1 - \frac{F^{Pe}(\xi)}{\sqrt{\xi} (1+f(\xi))^{Pe} \sqrt{m}} \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_0(F(\xi) \frac{\mu_n}{m}) \exp\left(-\frac{\mu_n^2 \eta}{m^2 Pe}\right) \right) \quad (7)$$

Здесь $B_n = \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)}$, а μ_n - корни функции Бесселя первого рода.

Общее решение краевой задачи (1) и (4) определялось в виде ряда (2), в котором $Z(\xi, \eta) = 0$. В качестве собственных функций принималась ортогональная с весом ξ система функций из уравнения (7), которая удовлетворяет граничным условиям. Подставляя (2) и (7) в (3), умножая обе части равенства на $\xi^2 \psi_n(\xi)$ и интегрируя в пределах от 0 до 1, определим постоянные A_n и собственные числа R_n :

$$A_n = \frac{2 R_n}{m^2 J_1^2(\mu_n)}; \quad R_n^2 = \frac{J_1(\mu_n) \mu_n}{R_n \sqrt{m}}$$

$$R_n = \int_0^1 \psi_n(\xi) d\xi; \quad \psi_n(\xi) = \frac{F^{1/2}(\xi)}{\sqrt{\xi(1+f(\xi))^{1/4}}} \int_0^{\xi} (F(\xi))^{1/2} \frac{M_n}{\pi} d\xi$$

Аналогичным образом установлены собственные значения, собственные функции и постоянные решения краевых задач турбулентного тепло- и массопереноса для случая движения среды в плоском и цилиндрическом каналах при граничных условиях 1 (таблица) и 2 рода. Рассмотрены случаи течения среды с постоянной и переменной скоростью по сечению канала. Впервые получены общие аналитические уравнения для определения потенциалов тепло- и массопереноса и интегральные выражения для тепловых и диффузионных чисел Нуссельта при турбулентном движении среды в каналах.

Анализ полученных решений показал, что данные уравнения имеют идентичный характер для случая движения среды в гладких и шероховатых каналах и горных выработках. Характерный режим течения в каналах и горных выработках определяется заданием соответствующих распределений скорости и параметров турбулентного переноса. На основе аналитических зависимостей проведены расчеты потенциалов тепло- и массопереноса при турбулентном течении сред в гладких каналах. Решения анализировались при различных функциях $f(\xi)$, $w(\xi)$, характеризующих параметры турбулентного переноса и скорость среды в каналах. Использовались значения функции $f(\xi)$ для трехслойной (уравнения Мартинелли), двухслойной (уравнения Райхардта), однослойной (уравнения Сполдинга) и др. схем турбулентного потока. Скорость среды задавалась в виде стержневого и логарифмического профилей. В каждом случае для чисел Прандтля и Шмидта $Pr(Sc) = 0,1-1,0$ определены 10-15, а для чисел $Pr(Sc) = 1,0-10$ 20-30 первых собственных чисел и характеристических функций полученных решений.

Достоверность методики расчета была проверена путем сопоставления результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными и полуэмпирическими зависимостями для условий турбулентного движения различных сред в гладких трубах. Кроме этого показано, что результаты расчетов удовлетворительно совпадают с имеющимися данными для собственных значений и постоянных решений задачи о теплообмене при турбулентном движении среды на термически начальном участке, которые установлены различными авторами на основе численного решения соответствующих уравнений переноса. На основе получен-

Таблица

Собственные значения и постоянные решения задачи о диффузии тепла или примеси в каналах и горных выработках при постоянной температуре или концентрации на стенке

Канал или горная вы- ботка	Процесс: диффузии: PR(SC)	Число N	Постоянные и собст. значения				
			RE	π	R_n^2	A_n	R_n
Гладкий канал	теплооб- мен	0	50000	0.1594	85.7	10.66	0.0365
		1			388.4	-8.23	-0.0121
		2			3692	1.70	0.0016
		3			4317	-2.32	-0.0016
	PR=0.7	4			13660	1.04	0.0006
Верховатый канал	теплооб- мен	0	50000	0.0940	198.5	19.36	0.0231
		1			1527	-8.81	-0.0045
		2			8923	2.96	0.0010
		3			9545	-4.41	-0.0011
	PR=0.7	4			28670	2.09	0.0004
Выработка, зак- репленная не- полными кре- пильными рамами из стоек и верхняков кру-	теплооб- мен	0	50000	0.0937	312.4	18.16	0.0215
		1			1578	-12.59	-0.0064
		2			7473	5.23	0.0017
		3			11190	-5.55	-0.0013
	PR=0.7	4			25450	3.48	0.0007
Глобо сечения	диффузия: водяного пара	0	50000	0.1117	222.3	15.22	0.0256
		1			1125	-10.53	-0.0076
		2			5267	4.42	0.0020
		3			7943	-4.67	-0.0016
	SC=0.49	4			17870	2.95	0.0008
$\Delta = 3.0$	диффузия: углекис- лого га-	0	50000	0.0750	482.0	22.68	0.0172
		1			2426	-15.78	-0.0051
		2			11630	6.47	0.0013
		3			17270	-6.93	-0.0011
	SC=1.14	4			39280	4.29	0.0005
$\xi = 4.24$	диффузия: углекис- лого га-	0	50000	0.0750	482.0	22.68	0.0172
		1			2426	-15.78	-0.0051
		2			11630	6.47	0.0013
		3			17270	-6.93	-0.0011
	SC=1.14	4			39280	4.29	0.0005

ных аналитических зависимостей проведены также расчеты потенциалов тепло- и массообмена при турбулентном течении сред в шероховатых каналах. Как и для случая гладких труб решения анализировались при различных функциях $f(\xi)$ и $\psi(\xi)$. Анализ проводился для моделей турбулентности в шероховатых каналах, предложенных Ротта, Миллиончиковым, Ходорковским и др. Скорость задавалась в виде стержневого профиля и логарифмического распределения. Установлено, что для каждого случая может быть определено 6-10 первых собственных чисел и характеристических функций полученных решений. Таким образом, на конкретных примерах решения внутренних задач переноса показано, что данный метод позволяет сравнительно просто получать приближенные аналитические решения краевых задач теплообмена, которые в настоящее время решаются численными методами.

Аналогичным образом были получены аналитические решения краевых задач гидродинамики при турбулентном движении сред в каналах и горных выработках. Соответствующая краевая задача переноса импульса в этом случае имеет вид:

$$\frac{1}{2} Re \xi^2 \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left((1+f(\xi)) \xi^2 \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) - 2 \xi^2 \left(\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right)_{\xi=1}, \quad (8)$$

при граничных условиях

$$\theta(\xi, 0) = 0; \quad \left. \frac{\partial \theta(\xi, \eta)}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0; \quad \theta(1, \eta) = 0; \quad (9)$$

$$\theta = \frac{\psi(\xi)}{W_{cp}}, \quad f(\xi) = \frac{V_T(\xi)}{V}$$

Здесь W - скорость; V - коэффициент кинематической вязкости; Re - число Рейнольдса.

Был разработан метод решения краевых задач гидродинамики при турбулентном движении среды в гладких и шероховатых каналах, заключающийся в решении соответствующей однородной задачи предложенным ранее приближенным методом, сведении задачи к интегральному уравнению Вольтерра и численно-аналитическом решении полученного интегрального уравнения. Впервые в аналитическом виде получены распределения скорости по сечению плоского и цилиндрического каналов, градиент давления вдоль течения вязкости и коэффициент гидравлического сопротивления. Показано, что эти решения имеют универсальный характер, так как могут быть использованы при описании турбулентного

движения среды в каналах и горных выработках. При этом соответствующий режим течения определяется заданием распределений коэффициента турбулентной кинематической вязкости в канале или горной выработке.

Общее решение краевой задачи (8) - (9) представлялось в виде

$$\theta(\xi, \eta) = \Psi(\xi, \eta) - \frac{4}{Re} \int_0^{\eta} \Psi(t) \Psi(\xi, \eta - t) dt, \quad (10)$$

где $\Psi(\xi, \eta)$ - решение соответствующей однородной задачи (1), а

$$\Psi(\eta) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \Psi_n(\eta) \quad ; \quad \Psi_1(\eta) = - \sum_{n=1}^{\infty} Z_n \exp(-P_n^2 \frac{2\eta}{Re});$$

$$\Psi_n(\eta) = \int_0^{\eta} \Psi_{n-1}(t) \Psi_1(\eta - t) dt$$

На основе аналитических зависимостей проведены расчеты распределений скорости при турбулентном движении среды в гладких каналах. Достоверность методики расчета была проверена путем сопоставления результатов расчета с имеющимися данными для условий турбулентного движения среды в гладких трубах. Аналогичным образом на основе аналитических зависимостей проведены расчеты распределений скорости при турбулентном движении среды в трубах с песочной шероховатостью. Анализ проводился для моделей турбулентности в существенно шероховатых каналах, предложенных Ротта, Миллиончиковым, Ходорковским и др. Достоверность методики расчетов проверялась аналогично случаям гладких труб. В результате проведенных расчетов показано, что при движении среды в существенно шероховатых каналах, к которым относятся и горные выработки, наиболее целесообразно применение моделей турбулентности близких по записи к уравнениям предложенным Ротта, при этом параметры моделей в случае шероховатости, отличной от песочной, должны быть подобраны по экспериментальным данным. Расчет гидравлического сопротивления и сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными является хорошей проверкой достоверности той или иной модели турбулентного переноса импульса.

Таким образом в результате моделирования и решения краевых задач разработаны математические модели, характеризующие процессы переноса в каналах и горных выработках.

Определение аэродинамических и тепломассообменных параметров при движении воздуха в горных выработках основывалось на использовании теории турбулентного пограничного слоя. Предложен метод расчета турбулентной кинематической вязкости в воздушном потоке выра-

ботки на основе применения двух уравнений переноса импульса при стабилизированном движении воздуха, при этом одно уравнение справедливо для всей области потока, а другое - только для турбулентного ядра потока. На основе первого уравнения, имеющего вид

$$\int_0^1 \frac{\xi^3 d\xi}{1 + \sqrt{1 + (2\ell^+)^2 \xi^2}} = \frac{8}{\text{Re } \lambda_*} \quad (11)$$

могут быть получены распределения пути перемешивания (ℓ) для конкретной выработки на основе использования информации о характеристиках шероховатости и крепи в горной выработке, ее аэродинамическом сопротивлении и др. В данном уравнении: λ_* - коэффициент гидравлического сопротивления; v_* - динамическая скорость; $\ell^+ = \ell v_* / \nu$ - параметр для пути перемешивания.

Путем обработки экспериментальных данных показано, что при движении воздуха в горных выработках с определенными допущениями возможно задание профилей скорости на основе логарифмических законов распределения. Эти законы не являются универсальными, так как параметры функций распределения скорости носят индивидуальный характер для конкретной горной выработки и зависят от шероховатости выработки и вида крепи. Из второго уравнения переноса импульса, имеющего вид

$$u^+(\xi) - u^+(0) = - \int_0^\xi \frac{\sqrt{\xi} d\xi}{a - b\xi^\alpha - c\xi^{2\alpha}} = \beta(\xi), \quad (12)$$

путь перемешивания для ядра турбулентного потока в горной выработке может быть определен из условия минимизации невязки между теоретическими распределениями и логарифмическими распределениями скорости:

$$\xi(\xi) = \left[\frac{1}{\mathcal{K}} \ell \kappa \frac{u^+(\xi)}{\kappa^+} + R_* - u^+(0) - \beta(\xi) \right]^2 = \min$$

При расчетах зависимость для пути перемешивания по всему сечению горной выработки представлялась в виде:

$$\frac{\ell}{R_0} = a - b\xi^\alpha - c\xi^{2\alpha} - \mathcal{K} \frac{\Delta y}{R_0}, \quad f(\xi) = \frac{V_T(\xi)}{V} - \frac{1}{2} (\sqrt{1 + (2\ell^+)^2 \xi^2} - 1) \quad (13)$$

В данных уравнениях: \mathcal{K} - постоянная Кармана; κ_s - высота шероховатости; R_0 - эквивалентный радиус; τ - касательное напряже-

ние; $\kappa^+ = \kappa_s v_*^* / \nu$; $u^+ = w / v_*^*$; $y^+ = y v_*^* / \nu$; $\tau^+ = \tau / \rho c_{gr}$.

На основе обработки большого числа шахтных экспериментальных данных показано, что зависимость для поправки Δy является линейной относительно параметра шероховатости κ^+

$$\Delta y^+ = C_m \kappa^+ + C_n , \quad (14)$$

причем коэффициенты этой прямой носят индивидуальный характер для конкретных горных выработок и зависят от продольного и поперечного калибров крепи. Для левообразных выработок данная поправка линейно зависит от числа Рейнольдса.

Впервые для выработок с различными видами крепи (выработки, закрепленные неполными крепежными рамами из стоек и верхняков круглого, квадратного или прямоугольного сечения; выработки, закрепленные арками из спецпрофиля типа СВП и др.) затабулированы параметры уравнения (13) и значения функции шероховатости R_x .

Коэффициенты турбулентной теплопроводности и диффузии для случая течения воздуха в горных выработках определялись аналогичным образом. При этом использовались уравнения

$$\frac{\lambda_T(f)}{\lambda} = \frac{\rho_z}{\rho_{zT}} \frac{\nu_T(f)}{\nu} , \quad \frac{\mu_T(f)}{\mu} = \frac{S_c}{S_{cT}} \frac{\nu_T(f)}{\nu} \quad (15)$$

Впервые проведены расчеты турбулентных чисел Прандтля (Pg_T) и Шмидта (Sc_T) для условий турбулентного движения среды в шероховатых каналах и горных выработках на основе сопоставления экспериментальных и расчетных значений для тепловых (NU) и диффузионных (NU_D) чисел Нуссельта. При движении воздуха в горных выработках значения чисел Pg_T и Sc_T зависят от вида граничного условия, числа Рейнольдса, поперечного и продольного калибров крепи. Характер зависимости чисел Pg_T и Sc_T определяется рассматриваемой краевой задачей и при моделировании не носит универсального характера, а характеризует связь между расчетными и экспериментальными данными в изучаемом физическом процессе.

Удовлетворительное совпадение с имеющимися экспериментальными данными результатов расчета теплоотдачи и аэродинамического сопротивления горных выработок, полученных с применением формулы (13), свидетельствует о том, что в этой формуле учтены основные особенности механизма турбулентного переноса в пристеночном потоке и турбулентном ядре при движении воздуха в горных выработках. Это с

достаточной очевидностью демонстрирует степень универсальности и достоверности предложенной модели турбулентности, характеризующей процессы турбулентного переноса при движении воздуха в горных выработках. Анализ данных по теплоотдаче, аэродинамическому сопротивлению при турбулентном движении воздуха показывает, что на основе предложенных методов расчета возможно с достаточной точностью качественное и количественное воспроизведение особенностей процессов теплообмена и турбулентного трения в горных выработках.

Закономерности совместного теплообмена в горных выработках устанавливались на основе проведения шахтных экспериментальных исследований. Было установлено, что в шахтах имеет место совместное влияние процессов тепло- и массообмена на формирование микроклимата в горных выработках. Экспериментальное определение параметров, характеризующих взаимосвязанный теплообмен в горных выработках, в условиях физической модели сопряжено с трудностями практического характера, т.к. почти невозможно смоделировать реальный горный массив, трудно учесть факторы существенно влияющие на теплообмен: шероховатость выработок, наличие загромаздящей сечение выработок крепи, горнотехнические особенности. Поэтому изучение процессов теплообмена в выработках необходимо осуществлять на опытных данных, полученных в натуральных условиях.

Методика проведения шахтных исследований предполагала выбор экспериментальных участков горных выработок с существенным приростом тепловлажностных параметров воздуха за счет теплообмена исключительно с горным массивом. В процессе исследований для экспериментальных участков определялись средние геометрические параметры выработки, расход воздуха, температура поверхностей, изменение тепловлажностных параметров воздуха по длине выработки и т. д. По экспериментальным данным находились тепловые q и массовые d' потоки, поступающие к вентиляционному воздуху, тепловые и диффузионные числа Нуссельта.

Исследования процессов теплообмена и проводились в лавах, подготовительных и воздухоподающих выработках угольных шахт глубиной 800-1200 м., разрабатывающих пологие и наклонные пласты мощностью 1,0-2,5 м. При этом изучались тепловые режимы в горных выработках практически всех глубоких шахт производственных объединений Донецкуголь, Жакеевуголь, Красноармейскуголь, Шахтерскантрацит, Торезантрацит, Первомайскуголь и др.

Для анализа было отобрано около 350 замеров, выполненных

в воздухоподающих выработках различного назначения. Температура пород в массиве экспериментальных данных изменялась в пределах 17,7 - 42,0 °С, поперечное сечение 5,0-20,0 м², время существования 10⁵ - 10⁶ часов, расход воздуха 2,0-50,0 м³/с. Из массива данных тепловых съемок, выполненных в подготовительных выработках, было отобрано более 220 замеров. Температура пород изменялась в пределах 27,4 - 48,0 °С, длина тупиковой части выработок 70-1050 м, поперечное сечение - 5,0-20,0 м². Расход воздуха в устье выработок составлял 2,1 - 12,4 м³/с. В массиве экспериментальных данных (200 замеров), собранных в лавах, температура пород изменялась в пределах 19,0-46,0 °С, длина лав - 150 - 250 м, нагрузка на очистной забой - 500-2500 т/сут, расход воздуха 4,5 - 28,3 м³/с.

В шахтных условиях процессы теплообмена зависят от технического назначения горных выработок, а параметры, характеризующие теплообмен, сильно коррелированы между собой. В частности показано, что тепловые и массовые потоки, поступающие к вентиляционному воздуху в горных выработках, тесно взаимосвязаны между собой и зависят от параметров, определяющих аэродинамические, горнотехнические и геологические условия. При обработке экспериментальных данных использовался эффективный коэффициент нестационарного теплообмена $\kappa_{\tau}^{эф}$, суммарно учитывавший в среднем все явные и скрытые тепловыделения в горных выработках. По аналогии с ним был введен эффективный коэффициент нестационарного массообмена:

$$q = \kappa_{\tau}^{эф} (t_s - t); \quad \delta' = \kappa_{\tau, м}^{эф} (X_s - X), \quad (16)$$

где t_s - температура пород; X - значение параметра, принятого за потенциал массопереноса. В качестве потенциала массопереноса принималось влагосодержание.

Обработка экспериментальных данных показала, что эти коэффициенты коррелированы между собой, при этом уравнения регрессии являются линейными функциями вида

$$\kappa_{\tau, м}^{эф} = m \kappa_{\tau}^{эф} + n \quad (17)$$

с достаточно высокими коэффициентами корреляции (0,86 - 0,92). Для воздухоподающих выработок $m = 0,182$, $n = -0,014$, очистных выработок $m = 0,144$, $n = -0,11$, призабойных зон подготовительных выработок $m = 0,164$, $n = -0,361$ и т. д.

Изменение температуропроводности и теплопроводности горного массива слабо влияет на тепловые и массовые потоки в выработках одинакового технологического назначения. Это позволяет критерий Кирпичева (K_{κ}) отнести к некоторой средней теплопроводности горного массива или теплопроводности воздуха. Впервые получены соответствующие регрессионные уравнения для экспериментально определенного критерия Кирпичева вида:

$$K_{\kappa} = A Re^x W_*^y V_*^z, \quad (18)$$

где W_* - параметр, учитывающий время существования выработки (число Фурье или его аналог), V_* - параметр, характеризующий геометрические размеры выработок одинакового технологического назначения. В частности, для воздухоподающих выработок $W_* = F_0$, $A = 1,4 \cdot 10^{-3}$, $X = 0,457$, $Y = -0,147$, $Z = 0$. Аналогичные зависимости получены для очистных и подготовительных выработок.

На основе обработки экспериментальных данных по тепло-массоотдаче в горных выработках установлено, что:

- интенсивность процессов массоотдачи в горных выработках определяется аэродинамическими и горнотехническими условиями, а также зависит от параметров влажностного состояния поверхности испарения и вентиляционного воздуха;

- процессы теплоотдачи в горных выработках осложняются массоотдачей, в связи с чем интенсивность переноса тепла в этом случае существенно другая, чем в условиях сухого теплообмена;

- зависимости, характеризующие тепло- и массоотдачу в горных выработках, носят нелинейный характер, так как зависят от параметров, определяющих влажностное состояние массива и воздуха.

При исследовании определялись корреляции между числами Нуссельта и параметрами определяющими аэродинамику и тепло-массоотдачу. Были получены следующие регрессионные уравнения

$$Nu = A_1 Re^{x_1} K_n^{y_1}; \quad K_n = \frac{\delta_{ст} R_0}{\nu \rho}; \quad (19)$$

$$Nu = A_2 Re^{x_2} K_n^{y_2} \varepsilon_{по}^{z_2}; \quad K_n = \frac{P_{н,ст} - P_n}{B}; \quad \varepsilon_{по} = \frac{P_n}{B}, \quad (20)$$

с высокими коэффициентами корреляции (0,65 - 0,8). Например, для очистных выработок глубоких шахт $A_1 = 1,02 \cdot 10^{-3}$; $X_1 = 1,1$; $Y_1 = 0,22$; $A_2 = 7,06 \cdot 10^{-4}$; $X_2 = 0,6$; $Y_2 = -0,44$; $Z_2 = -0,67$, для воздухопода-

них выработок $A_2 = 8,94 \cdot 10^{-4}$; $X_2 = 0,8$; $Y_2 = -0,294$; $Z_2 = 0$ и т. д. В приведенных выше уравнениях: ρ - плотность воздуха; $P_n, P_n(t)$ - парциальное давление водяных паров в потоке и на линии насыщения; B - атмосферное давление. Впервые установлено, что в горных выработках, в которых основная доля тепла поступает в скрытом виде, справедливы уравнения близкие к уравнениям Меркеля:

$$g = A_m B z + Y_m, \quad (21)$$

где $B_z = \text{Co}(i_{н,ст} - i)$; Co - коэффициент влагообмена; i - энтальпия. Для воздухоподающих выработок $A_m = 2,634$, $Y_m = -0,0031$, для призабойных зон подготовительных выработок $A_m = 0,705$, $Y_m = 0,0021$ и т. д. Коэффициенты корреляции уравнений (21) составили 0,7 - 0,8.

Из всего сказанного выше следует, что процессы совместного тепло-массообмена в горных выработках имеют свою специфику. Поэтому описание процессов тепло-массообмена в этом случае возможно только при условии рассмотрения этих явлений как одного целого.

Полученные результаты позволили разработать теорию и методы расчета процессов переноса при турбулентном движении рудничного воздуха и установить закономерности процессов диффузии в выработках.

Сформулированные ранее решения краевых задач переноса позволяют рассчитать процессы диффузии тепла, импульса и пассивной примеси вдоль горной выработки, при этом параметры турбулентного переноса определяются на основе экспериментальных данных. В качестве таких данных могут быть использованы зависимости по определению тепловых и диффузионных чисел Нуссельта, уравнения, характеризующие связь тепловых и массовых потоков, определенные в натуральных условиях, и т. д. Особенностью проведенных исследований является то, что впервые для расчета теплоотдачи, массоотдачи и аэродинамического сопротивления при движении воздуха в горных выработках применена одна и та же модель турбулентного переноса. При этом рассмотрены выработки с различными видами крепи: выработки, закрепленные неполными крепежными рамами из стоек и верхняков круглого, прямоугольного или квадратного сечения; выработки, закрепленные полными крепежными рамами из стоек и верхняков круглого сечения; выработки, закрепленные арками из спецпрофиля типа СВП; выработки, закрепленные неполными крепежными рамами из железобетонных круглых стоек и металлических двутавровых балок; очистные выработки и др.

Впервые на основе аналитических зависимостей проведены расчеты температуры и концентрации пассивных примесей при турбулентном движении воздуха в горных выработках. Установлены собственные значения, собственные функции и постоянные решения краевых задач турбулентного тепло- и массопереноса для случая движения воздуха в выработках с различными видами крепи. При расчетах анализировались процессы диффузии тепла ($Pr=0,7$), углекислого газа ($Sc=1,14$), метана ($Sc=0,84$) и водяного пара ($Sc=0,49$). Установлено существенное влияние вида горной выработки и характеристик ее шероховатости и крепи на параметры и характеристики процесса диффузии. Табулированы числа Нуссельта для случая турбулентного движения воздуха в горных выработках для процессов диффузии тепла, углекислого газа, метана и водяного пара. Тепловые и диффузионные числа Нуссельта увеличиваются с ростом числа Рейнольдса, уменьшением продольного и поперечного калибров крепи и увеличением чисел Прандтля или Шмидта. Показано, что в выработках с различными видами шероховатости заметно изменяются профили температуры и концентрации примеси. Достаточно хорошее совпадение результатов расчета процессов турбулентного тепло-массопереноса в горных выработках с экспериментальными данными является подтверждением достоверности разработанной методики расчета турбулентного переноса. Таким образом предложенные методы расчета позволяют учитывать аэродинамические и теплофизические особенности процессов тепло-массопереноса при движении воздуха в конкретных горных выработках.

Разработана методика получения расчетных формул для описания процессов диффузии импульса в горных выработках и проведено численное исследование аэродинамических процессов при турбулентном движении в воздухе в выработках с различными видами крепи. Рассчитаны профили турбулентной кинематической вязкости и скорости при различных режимах движения в основных горных выработках. Полученные данные свидетельствуют о том, что в выработках с различной шероховатостью профили скорости могут существенно различаться.

Достоверность методики расчетов была проверена путем сопоставления результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными и полумпирическими зависимостями для аэродинамического сопротивления горных выработок. Точность расчета аэродинамического сопротивления горных выработок по предложенным зависимостям достаточно высокая и погрешность составляет не более 1%. Таким образом хорошее совпадение результатов расчета с экспериментом для различных видов гор-

ных выработок свидетельствует о том, что в предложенной модели турбулентности учтены основные особенности механизма турбулентного переноса импульса в пристеночном потоке воздуха и турбулентном ядре горной выработки, что является важным для глубокого изучения процессов диффузии в горных выработках.

Полученные результаты позволили изучить аналогии между процессами переноса тепла, импульса и примесей в каналах и горных выработках. В гладких каналах при изменении чисел Прандтля или Шмидта от 0,7 до 1,2 турбулентные числа Pr_T и Sc_T близки к единице, поэтому и аналогия Рейнольдса

$$St = \frac{\lambda_*}{\rho} ; St_D = \frac{\lambda_*}{\rho} \quad (22)$$

приближенно справедлива. Здесь St , St_D - тепловое и диффузионное числа Стентона. При малых числах Рейнольдса и отклонении чисел Прандтля или Шмидта от единицы аналогия Рейнольдса может нарушаться. Для случая существенно шероховатых каналов и горных выработок уравнения, характеризующие аналогии между процессами тепло-массообмена и аэродинамики, зависят от характера шероховатости и вида крепи, гидродинамического режима движения и характеристик процесса диффузии. При диффузии тепла и примесей в горных выработках аналогии носят частный характер, вида

$$St = 8,175 \alpha \beta(Pz, Re) ; St_D = 8,175 \alpha \beta(Sc, Re) , \quad (23)$$

так как они привязаны к конкретной горной выработке. Здесь α - коэффициент аэродинамического сопротивления горной выработки.

Табулированы поправки $\beta(z, Re)$ к аналогии Рейнольдса (22)-(23) и показано, что при турбулентном движении среды в существенно шероховатых каналах величина $\beta(z, Re)$ уменьшается с ростом чисел Рейнольдса, Прандтля или Шмидта и увеличением шероховатости канала. Для случая горных выработок эта величина уменьшается с ростом числа Рейнольдса, а изменение поперечного и продольного калибров крепи оказывает достаточно сложное влияние. При больших значениях чисел Рейнольдса и для существенно шероховатых горных выработок поправка $\beta(z, Re)$ не зависит от чисел Прандтля и Шмидта. Для случая совместно протекающих тепло- и массообмена в горных выработках наблюдается нарушение аналогии Рейнольдса.

Формулирование комплекса практических методов расчета парамет-

ров, определяющих теплоемкость и аэродинамическое сопротивление горных выработок возможно на основе упрощения полученных расчетных моделей. Разработаны зависимости для определения аэродинамического сопротивления горных выработок на основе задания функций шероховатости R_* выработок. Показано путем вычисления определенного интеграла в уравнении (11), что данное выражение может быть приведено к виду, характерному для эмпирических уравнений, предложенных В. Н. Ворониным для определения аэродинамического сопротивления горных выработок. При этом функция шероховатости горных выработок R_* зависит от поперечного (δ) и продольного (Δ) калибров крепи и с достаточной степенью точности может быть представлена зависимостями вида

$$R_* = a_1 + a_2 \Delta + a_3 \Delta^2 + a_4 \delta \Delta + a_5 \delta^2 + a_6 \delta \quad (24)$$

с индивидуальными значениями констант для конкретных горных выработок. Результаты данного раздела показывают, что любую горную выработку можно рассматривать в виде эквивалентного канала с регулярной шероховатостью. В этом случае под регулярной шероховатостью понимается шероховатость в виде ребер по всему сечению канала с теми же значениями величин δ и Δ . Эквивалентность канала и горной выработки устанавливается по одинаковому значению аэродинамического сопротивления и идентичности логарифмического закона распределения скорости. Это позволяет использовать при изучении процессов теплообмена и аэродинамики в горных выработках апробированные методические подходы широко применяемые в настоящее время при исследовании турбулентных потоков в шероховатых каналах.

Получены прикладные зависимости для определения тепловых и диффузионных чисел Нуссельта и расчета характеристик процессов диффузии в горных выработках. Показано, что числа Нуссельта при известных аэродинамических условиях в выработке могут быть определены по аналитическим зависимостям, полученным на основе использования уравнений для пути перемешивания ℓ . Например, для процессов теплообмена число Нуссельта может быть определено на основе зависимости близкой по записи к эмпирической формуле Дипрея - Саберского

$$Nu = 8,175 P_2 Re \frac{\alpha}{1 + 2,86 \sqrt{\alpha} G_v} \quad (25)$$

где функция G_v для горных выработок имеет вид $G_v = a_2 (\kappa^+)^{4e_3}$

$-R_*$, а $a_z = \text{const}$ для конкретной горной выработки.

На основе уравнений теплового и массового балансов и установленных закономерностей процессов переноса тепла и водяного пара разработана теория совместного тепломассопереноса при взаимодействии рудничного воздуха с горным массивом, которая использовалась при создании методов прогноза климатических условий в горных выработках глубоких шахт. Наиболее простым является метод статистического прогнозирования, основанный на использовании регрессионных уравнений для определения температуры воздуха в зависимости от температуры пород, расхода воздуха, геометрических параметров и т. д. Точность прогноза температуры воздуха составляет $1.0 - 1.5^\circ\text{C}$. Приведены также регрессионные уравнения для определения энтальпии и влагосодержания рудничного воздуха. Полученные результаты включены в методики расчетов тепловых условий в горных выработках, которые утверждены в качестве нормативных документов. Использование балансовых уравнений и регрессионных зависимостей (16) - (18) позволило разработать аналитико - эмпирический метод прогноза тепловых условий и определения холодопотребности выработок, отличающийся простыми расчетными зависимостями в связи с линейностью исходных балансовых уравнений и не требующий предварительного задания параметров (например, относительной влажности), характеризующих массообмен. На основе данного метода разработаны программы для ЭВМ, которые использовались при разработке новых средств нормализации тепловых условий в шахтах. Точность прогноза тепловлажностных параметров воздуха в этом случае составляет по энтальпии до 4 кДж/кг , влагосодержанию до 1.2 г/кг и температуре до 1°C . Полученные результаты были использованы при определении параметров шахтных кондиционеров и систем нормализации тепловых условий в выработках глубоких шахт.

Выполненные исследования позволили также разработать метод прогнозирования тепловлажностных параметров воздуха в горных выработках, основанный на использовании имитационных математических моделей. Данный метод основан на специальном моделирующем алгоритме в котором исходные данные и некоторые параметры модели, имеющие вероятностный характер: числа Нуссельта, тепловые и массовые потоки в выработку и т. д., моделируются с учетом соответствующих допустимых интервалов

$$f = \bar{f} + \delta \quad (26)$$

где f - моделируемый фактор; \bar{f} - среднее значения фактора или функция регрессии для его вычисления; δ - величина, характеризующая эмпирическую функцию распределения остатков. Для моделирования величины δ применялись специальные программы, использующие генераторы случайных чисел. Разработка моделей в этом случае основывалась на использовании балансовых уравнений и регрессионных зависимостей (19) - (21). Учет влияния горного массива осуществлялся путем задания температуры стенки на основе регрессионных зависимостей при расчетах тепловых и массовых потоков (19) - (21). На базе данного метода получены аналитические выражения для определения относительной влажности воздуха по длине горных выработок, которые, например, для воздухоподающих выработок имеет вид

$$(1 - \varphi_0)^{\nu} - (1 - \varphi)^{\nu} = \nu \delta_1 \gamma \left(\frac{B}{P_H(t_{er})} \right)^{\nu}, \quad (27)$$

где φ - относительная влажность воздуха; ν, δ_1 - постоянные коэффициенты. Результаты проверки адекватности предложенного метода показали, что его прогнозные возможности вполне удовлетворительны. Данный метод прогноза климатических условий в горных выработках имеет важное теоретическое и прикладное значение, т. к. он является основой для разработки принципиально новой методики прогнозирования тепловлажностных параметров воздуха. Соответствующие программы для ПЭВМ, позволяют не только прогнозировать тепловлажностные параметры воздуха в горных выработках на основе имитационных моделей, учитывающих физику процессов массообмена, но и определять возможные диапазоны изменения этих параметров. Такой подход исключительно важен для оптимального проектирования шахтных систем кондиционирования воздуха и обоснованного выбора холодопроизводительности средств охлаждения воздуха.

Результаты работы позволили определить требуемые параметры новых средств охлаждения рудничного воздуха. Статистический прогноз холодопроизводительности проводился на основе использования имитационных моделей прогноза тепловлажностных параметров воздуха. Требуемая холодопроизводительность средств охлаждения при заданных параметрах воздуха на входе определялась путем осреднения полученных на основе расчетов значений холодопотребности для наиболее типичных условий. Такой подход позволил определить параметры номинального режима, разрабатываемых новых средств охлаждения шахтного воздуха.

На основе расчетов, выполненных в широком диапазоне горногео-

логических и горнотехнических условий, разработан параметрический ряд шахтных передвижных кондиционеров, позволяющих нормализовывать тепловые условия и обеспечивать регламентируемые нормы шахтного микроклимата в горных выработках. Область применения шахтных кондиционеров распространяется на тупиковые подготовительные выработки, проводимые на глубинах 900 - 1200 м., и на очистные выработки с ведением горных работ на глубинах 700 - 900 м. Полученные результаты явились основой для:

- разработки технического задания и создания машины для охлаждения шахтного воздуха 20КПШ-115, серийный выпуск которой освоен АНПО "Одесхолод" с 1988 г.;

- разработки технического задания и создания машины для охлаждения шахтного воздуха КПШ-130-2-0, испытания опытного образца которой завершаются МакНИИ, а серийный выпуск планируется АНПО "Одесхолод" с 1995 г.;

- разработки технического задания на машину для охлаждения шахтного воздуха КПШ-110-2-0, исходных технических требований и технического задания на машину для охлаждения и осушения шахтного воздуха с турбокомпрессором ТКПШ-230-2-0, серийный выпуск которой планируется АНПО "Одесхолод" с 1995-1996 г.

Для нормализации тепловых условий в выработках, проводимых комбайнами на более глубоких горизонтах, предложены системы охлаждения шахтного воздуха в основу которых положено рассредоточенное охлаждение воздуха. Проведенные расчеты показали, что поддержание регламентируемых для шахт температур воздуха в рабочих зонах горных выработок, протяженных или расположенных на глубоких горизонтах, требует холодопроизводительности воздухоохлаждающих устройств до 300 кВт и выше. Все это обуславливает необходимость комплексной нормализации тепловых условий путем охлаждения воздуха и локализации тепла в местах его образования. Разработанные с учетом этого системы охлаждения воздуха для тупиковых выработок предполагают охлаждение подаваемого к забой воздуха, а также использование для нормализации тепловых условий охлаждаемых элементов забойного оборудования (теплообменных устройств маслобака комбайна, электродвигателя исполнительного органа и т. д.) и охлажденной воды, подаваемой на пылеподавление. Один из вариантов системы охлаждения воздуха реализован в знедрен на шахте им. В.М. Бажанова ПО Макеевуголь. Результаты шахтных исследований подтвердили перспективность применения в глубоких шахтах систем охлаждения воздуха, обес-

печивающих использование для нормализации тепловых условий элементов забойного оборудования, охлаждаемой воды для пылеподавления и мобильных воздухоохладителей или кондиционеров типа КИШ. Для этой цели исключительно перспективны холодильные машины (типа ТКШ 230-2-0), позволяющие охлаждать воздух и получать холодную воду для целей отвода тепла в местах его образования.

Из вышесказанного видно, что перспективы применения результатов работы в прикладном плане в рудничной вентиляции достаточно обширны, т.к. разработанные методы позволяют сформулировать новую методическую базу для расчетов процессов диффузии в горных выработках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получено решение актуальной научной проблемы установления закономерностей диффузии тепла, импульса и примесей при турбулентном течении рудничного воздуха для развития теории расчета процессов теплообмена и аэродинамики, имеющей важное значение для повышения эффективности и безопасности эксплуатации шахт.

Основные выводы и результаты работы сводятся к следующему:

1. Разработан метод решения краевых задач турбулентного переноса, позволивший впервые получить приближенные аналитические решения краевых задач теплообмена и аэродинамики, имеющих важное значение в теории диффузии при движении сред в каналах и горных выработках. Это дало возможность сформулировать теоретические методы анализа процессов переноса и впервые с применением единого подхода провести исследования процессов теплообмена и турбулентного течения воздуха в горных выработках.

2. Впервые разработана общая теория описания процессов диффузии и аналитические методы расчета турбулентного переноса в горных выработках. На основе этих методов получены математические модели и зависимости, характеризующие диффузию тепла, импульса и пассивных примесей при турбулентном движении воздуха и проведены расчеты процессов теплообмена и аэродинамики в горных выработках. Сравнение результатов с опытными данными подтвердило достоверность предложенных методов расчета. Теоретические результаты могут служить основой для дальнейшего развития методов анализа процессов переноса и аналитического изучения более сложных задач рудничной вентиляции (например, процессов диффузии активных примесей, механизма

возникновения слоистых скоплений метана и др.).

3. Предложены способы моделирования турбулентности в горных выработках и физически обоснованный метод расчета аэродинамических и тепломассообменных характеристик при движении воздуха в выработках, учитывающий основные особенности турбулентного переноса. Это позволило на основе экспериментальных данных впервые разработать модели и зависимости для расчета основных характеристик турбулентного переноса для выработок с различными видами шероховатости и крепи: пути перемешивания, коэффициентов турбулентной кинематической вязкости, теплопроводности и диффузии, турбулентных чисел Прандтля и Шмидта и др., а также изучить структуру и особенности турбулентных потоков воздуха в горных выработках.

4. Экспериментально установлены закономерности и зависимости, характеризующие совместный тепломассообмен и взаимосвязь процессов переноса тепла и водяного пара в горных выработках, позволяющие учесть при расчетах специфические особенности процессов переноса в реальных горных выработках и получить новые данные по тепломассоотдаче в шахтах.

5. Изучены закономерности диффузии тепла, импульса и пассивных примесей в горных выработках, что позволило развить общие научные представления о природе и особенностях турбулентных течений рудничного воздуха и сформулировать комплекс практических методов расчета параметров, характеризующих тепломассоотдачу и аэродинамическое сопротивление горных выработок. Разработанные методы расчета процессов переноса в совокупности можно рассматривать как единую теорию аналитического моделирования процессов тепломассообмена и аэродинамики в горных выработках. Применение этой теории позволило:

- воспроизвести и объяснить ряд наблюдаемых особенностей и закономерностей протекания процессов тепломассообмена и аэродинамики и составить достаточно полное и общее представление о процессах переноса в горных выработках;

- впервые аналитическим путем получить данные по тепломассоотдаче, аэродинамическому сопротивлению, профилям скорости, температуры и примеси и характеристикам турбулентного переноса в горных выработках, а также сформулировать зависимости для их расчета;

- установить аналогии между процессами турбулентного переноса.

6. Разработаны методы прогноза тепловлажностных параметров воздуха в горных выработках: простой статистический метод прогнозирования, основанный на использовании регрессионных зависимостей

для расчета параметров воздуха, метод прогноза тепловых условий и холодопотребности выработок, основанный на балансовых уравнениях, и метод прогнозирования температуры, энтальпии, влагосодержания и относительной влажности воздуха, использующий экспериментально установленные закономерности, характеризующие физику процессов массообмена в горных выработках. Данные методы отличаются использованием алгоритмов имитационного моделирования и являются научной основой для разработки методик прогноза климатических условий в горных выработках и определения параметров новых средств нормализации тепловых условий в шахтах.

7. На основе предложенных методов расчета определены параметры новых средств охлаждения рудничного воздуха. Разработан параметрический ряд шахтных передвижных кондиционеров, позволяющих нормализовывать тепловые условия и обеспечивать регламентируемые нормы шахтного микроклимата в горных выработках. Область применения шахтных кондиционеров распространяется на тупиковые подготовительные выработки, проводимые на глубинах 900 - 1200 м., и на очистные выработки с ведением горных работ на глубинах 700 - 900 м. Для нормализации тепловых условий в выработках, проводимых комбайнами на более глубоких горизонтах, предложены системы охлаждения шахтного воздуха в основу которых положено охлаждение воздуха в воздухоохладителе и за счет использования охлаждаемых элементов забойного оборудования (теплообменных устройств маслобака комбайна, электродвигателя исполнительного органа и т. д.), а также охлаждения воды, подаваемой на пылеподавление.

8. Научные основы работы реализованы институтами МакНИИ и ИГТИ НАН Украины, научно-производственным объединением "Одесхолод", производственными объединениями "Донецкуголь" и "Макеевуголь".

Результаты работы включены в отраслевые методические документы и внедрены при разработке и создании шахтных передвижных кондиционеров: холодильных машин 20КПШ-115, КПШ-110-2-0, КПШ-130-2-0 и ТКПШ-230-2-0, а также при создании систем охлаждения шахтного воздуха. Шахтная холодильная машина 20КПШ-115 серийно выпускается АНПО "Одесхолод" с 1988 г. Серийный выпуск машин КПШ-130-2-0 и ТКПШ-230-2-0 планируется с 1995 - 1996 г.

Основные научные результаты работы изложены в опубликованной монографии, где сформулированы теоретические основы анализа процессов диффузии в горных выработках.

Внедрение результатов работы обеспечит социальный и экономи-

ческий эффект, которые достигаются повышением эффективности эксплуатации шахт, созданием безопасных и комфортных условий труда горнорабочих.

Основные научные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Яковенко А.К., Хохотва Н.Н., Аверин Г.В. К вопросу аналитического исследования равномерно-рассредоточенного охлаждения воздуха с учетом теплообмена. // Вопросы вентиляции, охлаждения воздуха, борьбы с пылью и контроль рудничной атмосферы в шахтах.: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1981. - с. 29 - 33.

2. Яковенко А.К., Аверин Г.В. Сопряженная задача конвективного теплообмена в лавах глубоких шахт. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1982. - №6. - с. 80 - 86.

3. Аверин Г.В., Яковенко А.К. Метод определения тепловыделений горного массива в лавах глубоких шахт. - Деп. ЦНИИУголь. - М. - 1983. - 33 с.

4. Яковенко А.К., Аверин Г.В. О постановке сопряженных задач в горной теплофизике. // В сб.: Вопросы теории и практики разработки и обогащения полезных ископаемых. - М.: Изд. ИПКОН АН СССР. - 1983. - с. 187 - 191.

5. Аверин Г.В., Дрига Я.И., Яковенко А.К. Тепловой режим призабойных зон тупиковых выработок и способы его регулирования. // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело. - 1983. - № 2. - с. 4 - 6.

6. Яковенко А.К., Аверин Г.В. К вопросу определения коэффициента теплоотдачи горного массива при малых числах Фурье. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1984. - №1. - с. 63 - 67.

7. Прогноз тепловых условий в выработках глубоких шахт. / Найманов А.З., Хухлович А.Г., Аверин Г.В., Яковенко А.К. // Безопасность труда в промышленности. - 1985. - № 5. - с. 46.

8. Аверин Г.В. Корреляционная связь коэффициентов нестационарного тепло- и массообмена в тупиковых подготовительных выработках. // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1985. - с. 46 - 49.

9. Яковенко А.К., Аверин Г.В. Статистический анализ взаимосвязи теплообменных процессов в горных выработках. // Физические процессы горного производства. Тепломассоперенос в горных выра-

ботках и породных коллекторах. - Л., 1985. - с. 68 - 72.

10. Аверин Г.В., Секачева Т.С., Яковенко А.К. Охлаждение воздуха в высокомеханизированных подготовительных выработках. // Безопасность труда в промышленности. - 1985. - № 8. - с. 20 - 22.

11. Аверин Г.В., Цейтлин Ю.А. Исследование характеристик шахтных кондиционеров КПП - 90. // Уголь Украины. - 1986. - № 12. - с. 33 - 34.

12. Яковенко А.К., Аверин Г.В. Исследование некоторых характеристик турбулентных потоков в горных выработках. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1986. - № 4. - с. 94 - 98.

13. Черниченко В.К., Яковенко А.К., Аверин Г.В. Математическое моделирование изменения тепловлажностных параметров воздуха в лавах при искусственном охлаждении. // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1986. - с. 69 - 77.

14. Яковенко А.К., Аверин Г.В. О сопряженной задаче конвективного теплообмена между рудничным воздухом и горным массивом. // В сб.: Проблемы горной теплофизики. - Л.: Изд. ЛГИ. - 1986. - № 4. - с. 22 - 24.

15. Аверин Г.В., Черниченко В.К., Яковенко А.К. Математическое моделирование тепломассообмена в лавах глубоких шахт. // Промышленная теплофизика. - 1987. - Том 9. - № 4. - с. 66 - 69.

16. Аверин Г.В., Яковенко А.К., Секачева Т.С. Статистический прогноз холодопотребности туниковых выработок при имитационном моделировании тепловлажностных параметров воздуха. // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1987. - с. 105 - 113.

17. Аверин Г.В., Яковенко А.К. К вопросу определения коэффициента турбулентной диффузии в комплексно-механизированных лавах. // В сб.: Проблемы совершенствования пылегазового режима на угольных шахтах. - Изд. МакНИИ. - Макеевка. - 1988. - с. 9 - 10.

18. Яковенко А.К., Аверин Г.В., Юцкевич М.В. Тепловой режим высокомеханизированных туниковых выработок глубоких шахт и его нормализация. // В сб.: Интенсивная и безотходная технология разработки угольных и сланцевых месторождений. - М.: Изд. МГИ. - 1989. - с. 76.

19. Аверин Г.В., Яковенко А.К. Об определении коэффициентов турбулентной диффузии и теплопроводности в горных выработках. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1990. -

№5. - с. 90 - 92.

20. Аверин Г.В., Яковенко А.К. Тепломассоотдача горного массива в рудничном воздухе в лавах глубоких шахт. // Безопасная эксплуатация оборудования и машин в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1990. - с. 161 - 164.

21. Аверин Г.В., Черниченко В.К., Яковенко А.К. Взаимосвязь тепловых и массовых потоков, поступающих к рудничному воздуху. // Безопасная эксплуатация оборудования и машин в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1990. - с. 155 - 161.

22. Аверин Г.В., Черниченко В.К., Яковенко А.К. Закономерности тепломассопереноса в горных выработках глубоких шахт. // В сб.: докладов 24 междунар. конфер. научно-исслед. институтов по безопасности работ в горной пром. - Ч 2. - Донецк. - 1991. - с. 340 - 351.

23. Аверин Г.В. Анализ моделей турбулентности для расчета движения воздуха в горных выработках. // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1991. - с. 146 - 153.

24. Аверин Г.В., Яковенко А.К. Тепломассоотдача горного массива к рудничному воздуху в тупиковых подготовительных выработках глубоких шахт. // Безопасная эксплуатация оборудования и машин в угольных шахтах: Сб. науч. тр. МакНИИ. - Макеевка, 1991. - с. 100 - 103.

25. Аверин Г.В. Приближенный метод решения некоторых краевых задач конвективного теплопереноса. // Тепломассообмен-ММФ-92. Конвективный теплообмен. Т1, Ч1. - Минск: АНК "ИТМО им. А.В. Лыкова", АНБ, 1992. - с. 77-80.

26. Аверин Г.В. Об приближенном решении краевой задачи теплопереноса при турбулентном течении жидкости в цилиндрическом канале. // Инженерно-физический журнал. - 1992. - Том 62. - №1. - с. 146 - 147.

27. Аверин Г.В. Приближенное решение задачи теплопереноса и диффузии пассивной примеси при турбулентном движении воздуха в горных выработках. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 1992. - №1. - с. 89 - 98.

28. Бобров А.И., Аверин Г.В. Теоретические основы переноса импульса, тепла и примеси в горных выработках. // Макеевка-Донбасс: Изд. МакНИИ. - 1994. - 270 с.

Подписано к печати 29.07.94 г.
Тираж 110 экз. Заказ № 159. Ротапринт МакНИИ.

г. Макеевка Донецкой обл., ул. Дихачева, 60.

AB 32.247

AB 32.247

Faint, illegible text covering the majority of the page, likely bleed-through from the reverse side.