

**ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДИФФУЗИИ ТЕПЛА,
ИМПУЛЬСА И ПРИМЕСЕЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ УГОЛЬНЫХ
ШАХТ**

Изложены основные положения теоретического анализа диффузии тепла, импульса и примесей, а также исследована турбулентность течений воздуха в горных выработках угольных шахт

**PROBLEM OF THEORETICAL ANALYSIS OF DIFFUSION OF HEAT,
IMPULSE AND ADMIXTURES IN MOUNTAIN MAKING OF COAL MINES**

The substantive provisions of theoretical analysis of diffusion of heat, impulse and admixtures of an are expounded turbulence of flows of air in the mountain making of coal mines is also explored

После периода интенсивных экспериментальных исследований процессов теплообмена в горных выработках глубоких шахт в 60-80 годах [1-4] в последнее время наблюдается сокращение таких исследований, что объясняется в первую очередь сложностью физического моделирования этих процессов и значительной трудоемкостью шахтных экспериментов. Все это сдерживает дальнейшее развитие теоретических исследований в данной области. В частности, остаются практически неизученными вопросы об одновременно протекающих процессах тепло- и массоотдачи в горных выработках, о связи аэродинамических и тепловых параметров, о границах применимости аналогий между процессами переноса теплоты и массы, о достоверности целого ряда математических моделей тепло- и массопереноса в горном массиве и др.

Совместный тепло- и массообмен горного массива с рудничным воздухом до настоящего времени изучен мало. Наличие фазовых превращений в виде испарения воды существенно влияет на интенсивность тепло- и массообмена между поверхностью горного массива и окружающей средой. Кроме этого, перенос тепла и массы внутри горного массива имеет свою специфику. Механизм переноса тепла и диффузии влаги в этом случае слабо исследован экспериментально и поэтому аналитическое изучение этих процессов, базирующееся на применении математических моделей тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах [5-7] не приводит к надежным результатам.

На формирование микроклимата в горных выработках шахт оказывает значительное влияние совместное протекание процессов тепло- и массообмена. Экспериментальное определение параметров, характеризующих взаимосвязанный тепломассообмен в горных выработках, в условиях физического моделирования сопряжено с трудностями практического характера, так как невозможно смоделировать реальный горный массив, обладающий сложной капиллярно-пористой, трещиноватой и неоднородной структурой. Существенное влияние на процессы тепломассоотдачи оказывают факторы, которые также трудно учесть при физическом моделировании: значительная шероховатость вырабо-

ток, наличие загромождающей сечение выработок крепи, горнотехнические и различные технологические особенности выработок и др.

Большинство встречающихся на практике воздушных потоков в горных выработках относятся к типу турбулентных, критерием устойчивости которых является число Рейнольдса. Экспериментально установлено критическое его значение, выше которого турбулентное движение является устойчивым. Для гладких труб это значение составляет $R_e = 2300$, для горных выработок –

$R_e = 1000 - 1500$. Критическое значение числа Рейнольдса зависит от многих факторов, в частности, от градиента давления, турбулентности воздушного потока, шероховатости поверхности, процессов тепломассообмена и др. Так, положительный градиент давления или замедленное течение воздуха дестабилизирует пограничный слой на стенке и уменьшает критическое число Рейнольдса, отрицательный градиент или ускоренное течение потока повышает устойчивость пограничного слоя. В горных выработках на входе любого участка воздушный поток является сильно турбулизированным, на что в значительной степени оказывают влияние изменение сечения выработки (расширение или сужение), препятствия на пути движения воздуха и различные лобовые сопротивления, повороты воздушного потока, различные особенности вентиляционных ветвей и др.

Собственная шероховатость горных выработок, обусловленная шероховатостью стенок выработки, наличием крепи или выступающих элементов является одним из важнейших факторов, характеризующих турбулентность воздушного потока. Большую роль на переход от ламинарного характера движения к турбулентному оказывают притечки и утечки воздуха в горных выработках. Непрерывное или дискретное распределение утечек воздуха стабилизирует воздушный поток и снижает аэродинамическое сопротивление. Притечки воздуха, поступающие в выработку, дестабилизируют пограничный слой. Достаточно сложным является влияние тепломассообмена поверхности выработок на устойчивость течения воздуха. Для газов нагревание дестабилизирует пограничный слой, так же, как испарение влаги и поступление вещества в пограничный слой с поверхности.

Исследование турбулентных течений в каналах постоянного сечения исключительно важно в связи с их широким распространением. К этому классу течений можно отнести и турбулентные течения воздуха в горных выработках. В сечениях горной выработки, расположенных после участка развития течения, средние характеристики течения и турбулентность остаются одинаковыми, так как течение становится полностью развитым.

На практике турбулентные течения в каналах разделяют на четыре основных режима движения, к которым относятся течения: в гладких трубах, в каналах с гидравлически гладкой поверхностью, в каналах с шероховатой поверхностью, а также в каналах с полным проявлением шероховатости.

При турбулентном течении в гидравлически гладких каналах числа Рейнольдса находятся в пределах $2400 < R_e < 3000000$. Различные эффекты на течение жидкости оказывает влияние стенки. Уменьшение скорости до нуля при

приближении к стенке канала совместно с турбулентным переносом импульса обуславливает значительный градиент скорости, что приводит к существенной диссипации энергии. В свою очередь, уменьшение осевой скорости при приближении к стенке приводит к уменьшению переноса энергии за счет среднего движения. В связи с этим структура турбулентности существенно изменяется в направлении, перпендикулярном каналу и неодинакова для различных слоев потока.

Наиболее быстрые изменения имеют место непосредственно около стенки в так называемом вязком слое, где турбулентное напряжение пренебрежимо мало. Изменение средней скорости, температуры или концентрации определяется соответственно коэффициентами молекулярной вязкости, теплопроводности и диффузии. Изменение скорости в этом слое практически линейно.

При удалении от стенки канала находится область, составляющая промежуточный (буферный) слой, в которой вязкие и турбулентные напряжения сравнимы по величине. Аналогичным образом потоки тепла и примеси, переносимые за счет турбулентной и молекулярной теплопроводности (диффузии), также сравнимы между собой. При существенном удалении от стенки располагается полностью турбулентный слой, в котором влияние стенки выражено слабо и турбулентность развита в такой степени, что вязкими напряжениями можно пренебречь. Потоки тепла и вещества, переносимые в этом слое за счет молекулярной теплопроводности и диффузии, также пренебрежимо малы. Изменение скорости в этой области подчиняется логарифмическому закону.

Вблизи центра трубы существует четвертый слой, который называют турбулентным ядром, где справедлив закон следа. При течении воздуха в каналах влияние этого слоя пренебрежимо мало.

В литературе указанные четыре слоя трактуются по-разному. Часто ламинарный и промежуточный слои объединяют в один вязкий слой, турбулентный слой и слой вблизи центра канала объединяют в одно турбулентное ядро и т.д. В связи с этим авторами рассматриваются одно-, двух- и трехслойные турбулентные режимы движения сред в каналах. В вязком слое вблизи стенки касательное напряжение обычно слабо изменяется по толщине слоя, в связи с чем касательное напряжение в этом слое часто принимают постоянным. В свою очередь в турбулентном ядре скорость потока по толщине изменяется обычно мало.

В горных выработках описанный режим движения наблюдается редко, однако он исключительно важен для понимания турбулентного движения воздуха.

Следующий важный случай - это турбулентное течение в гидравлически гладких каналах, когда шероховатость не оказывает влияния на коэффициент гидравлического сопротивления. Это наблюдается в том случае, если высота элементов шероховатости не превышает толщины вязкого слоя. Такое течение схоже с течением в турбулентном пограничном слое, характеризующимся большими числами Рейнольдса. Данное течение в каналах наблюдается при

$R_e > 2400$ и параметрах шероховатости $k^+ < 5$. Область течения в этом режиме включает вязкий подслой, буферный слой и турбулентное ядро. Для движения воздуха в горных выработках такой режим не характерен.

Турбулентный режим течения в каналах с шероховатой поверхностью характеризуется значениями чисел Рейнольдса $R_e > 2400$ и параметра шероховатости $5 < k^+ < 60$. В этом случае неровности поверхности частично выступают за пределы вязкого слоя и обуславливают наличие дополнительного сопротивления, при этом коэффициент гидравлического сопротивления зависит от числа Рейнольдса и шероховатости поверхности. Данный режим течения может наблюдаться в горных выработках с хорошо заглаженной бетонной поверхностью, при небольших числах Рейнольдса.

Турбулентный режим течения с полным проявлением шероховатости наиболее характерен для горных выработок. Для этого режима значения чисел Рейнольдса $R_e > 2400$ и параметра шероховатости $k^+ > 60$. Все элементы шероховатости в данном случае выступают из вязкого подслоя и определяют величину гидравлического сопротивления. Для этого режима вязкость практически не играет никакой роли и гидравлическое сопротивление не зависит от числа Рейнольдса и является только функцией шероховатости. Перепад давления на участке канала является квадратичной функцией средней скорости. Влияние шероховатости на турбулентное течение является весьма сложным, так как она увеличивает турбулентность вблизи стенки. Этот режим течения лучше всего изучен для каналов с песочно-зернистой шероховатостью. Горные выработки относятся к каналам с исключительно сильной шероховатостью, так как основной вклад в величину гидравлического сопротивления вносит сопротивление элементов крепи. Высота выступов крепи может значительно превосходить по величине высоту выступов собственной шероховатости стенок горных выработок и быть иногда соизмеримой с эквивалентным диаметром выработки.

Попытки систематического исследования влияния шероховатости на турбулентность течения воздуха в горных выработках наталкиваются на принципиальную трудность, связанную с большим многообразием геометрических форм крепи и шероховатости стенок и, следовательно, с большим числом параметров, определяющих шероховатость. В шероховатых каналах часто турбулентное течение рассматривают в виде двухслойных потоков. Область вблизи стенки является слоем шероховатости. Пристеночный слой вблизи шероховатой поверхности можно условно разделить на две области: слой постоянного касательного напряжения с параллельным течением и слой шероховатости, в котором среднее течение обычно является трехмерным с достаточно сложной структурой. Это связано с тем, что при обтекании элементов шероховатости возникает множество отрывных течений и течений с повторным присоединением к поверхности. За элементами крепи возможно образование вихрей. Непосредственно у поверхности имеют место различные мелкомасштабные вязкие слои. Кроме пристеночного слоя выделяют еще турбулентное ядро, где справедлив логарифмический закон распределения скорости для шероховатых

каналов. В горных выработках в связи с различной шероховатостью стенок и почвы нарушается симметричность потока, характерная для шероховатых каналов с однородной шероховатостью. Все это усложняет картину турбулентных течений в горных выработках.

На процессы переноса при движении среды в каналах оказывает влияние поле средних скоростей и пульсационных составляющих скоростей. Поэтому анализ любого процесса переноса тепла и примеси в гладких и шероховатых каналах требует определенного представления о процессе переноса импульса и соответствующего изменения скорости.

При определенных условиях существует взаимозависимость между полем скоростей и тепло- и массопереносом, имеющая достаточно сложный вид, в особенности для шероховатых каналов. Поэтому основная задача теории турбулентного пограничного слоя заключается в установлении связи между турбулентной вязкостью и параметрами осредненного течения в пограничном слое. Решение этой задачи при моделировании турбулентности облегчается эмпирически установленным фактом связи между турбулентной кинематической вязкостью и осредненными значениями параметров в большинстве пограничных слоев, что позволяет сформулировать универсальные законы распределения осредненных значений скорости, температуры, примеси и касательных напряжений.

Сложность турбулентных течений в горных выработках на первый план выдвигает разработку дифференциальных методов расчета турбулентных пограничных слоев. В этом случае компоненты скорости, температуры и примеси описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Аэродинамические и тепломассообменные расчеты шахтных вентиляционных сетей в настоящее время производятся методами одномерной гидродинамики и тепломассопереноса, позволяющими учесть многие характерные черты этих явлений. Однако, соответствующая система уравнений неизбежно оказывается незамкнутой и недостающая информация заимствуется из эксперимента. Кроме этого, на основе одномерных балансовых уравнений принципиально невозможно изучение механизма турбулентного переноса и параметров турбулентных потоков в горных выработках, установление закономерностей и решение важных задач аэродинамики, теплопереноса и диффузии примеси при турбулентном движении воздуха в горных выработках. В связи с этим проблема создания теоретических основ расчета процессов диффузии тепла, импульса и примеси в горных выработках на основе дифференциальных методов имеет первостепенное значение.

Рассмотрим более детально структуру и характеристику турбулентных потоков при движении воздуха в каналах и горных выработках.

Наиболее полно внутренняя структура турбулентных потоков изучена для гладких каналов, для которых существует большое количество моделей турбулентности. В простейших из них параметры, характеризующие процессы турбулентного переноса, выражаются через распределение осредненной скорости. В более сложных моделях используются уравнения турбулентного переноса,

причем входящие в эти уравнения члены диффузионного переноса и диссипации соответствующих величин аппроксимируются функциями, вид которых определяется из физических соображений или согласно теории размерности. Постоянные величины данных функций находятся путем адаптации модели экспериментальным данным. В некоторых более общих моделях, основанных на использовании уравнений переноса, параметры турбулентного переноса выражаются через осредненные характеристики турбулентности (линейный масштаб турбулентности, турбулентную кинетическую энергию и др.).

Турбулентные характеристики потоков исследовались большим количеством авторов [8-19].

В настоящее время весьма неудовлетворительно изучен вопрос о пространственном изменении турбулентного числа Прандтля P_{r_t} вблизи стенки. На практике применяются зависимости, которые дают либо уменьшение, либо увеличение числа P_{r_t} у стенки [20], например, при течении воздуха в трубах:

$$P_{r_t} = \left(1 + 400 \frac{y}{R_e} \right)^{-1}$$

а для воздушного пограничного слоя толщиной δ :

$$P_{r_t} = (1,25 \div 1,75) \frac{y}{\delta}$$

Многие авторы часто предполагают, что турбулентные числа Прандтля или Шмидта не изменяются поперек потока, но зависят от числа Рейнольдса и молекулярного числа Прандтля. Например, в [20] получено значение P_{r_t} при турбулентном течении воздуха:

$$P_{r_t} = \frac{1 + 102,8 R_e^{-\frac{1}{2}}}{1 + 202 R_e^{-\frac{1}{2}}}$$

В целом газы имеют умеренные значения молекулярных чисел Прандтля ($P_r = 0,65 - 1,1$) и Шмидта ($S_c = 0,2 - 1,4$), приемлемые для использования при расчетах тепло- и массообмена аналогии Рейнольдса (табл. 1).

Таблица 1 - Тепловые и диффузионные свойства газов при атмосферном давлении

Среда	Температура С°	Коэф. температура-туропров. а 10 ⁻⁶ , м ² /с	Коэф. кинемат. вязкости γ 10 ⁻⁶ , м ² /с	Число Прандля Pr	Среда	Растворенная диффундирующая субстанция	Температура, С°	Коэф. Диффузии D 10 ⁻⁶ , м ² /с	Число Шмидта Sc
Воздух	27	22,16	15,68	0,708	Воздух	Аммиак	0	21,65	0,634
Аммиак	0	11,8	13,08	0,900		Двуокись Углерода	0	11,98	1,14
Двуокись Углерода	27	8,32	8,32	0,770		Хлор	0	9,28	1,420
Водород	27	157,9	109,5	0,706		Водород	0	54,72	0,250
Кислород	27	22,4	15,68	0,709		Метан	0	15,73	0,840
Водяной Пар	107	20,36	21,65	1,060		Кислород	0	15,33	0,900
Азот	27	22,04	15,63	0,713		Водяной Пар	16	28,15	0,488

Для практических расчетов существенно установление характеристик турбулентных потоков в горных выработках (коэффициентов турбулентной кинематической вязкости, теплопроводности и диффузии) и связь этих характеристик с параметрами осредненного турбулентного движения, шероховатостью выработок, сопротивлением и т.д. Полученные результаты могут быть использованы при установлении аналогий для турбулентных потоков воздуха в горных выработках. С практической точки зрения это позволяет использовать обширный экспериментальный материал по аэродинамике потоков в горных выработках при расчетах диффузии тепла и вещества, а также процессов диффузии активной примеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брайчева И.Д. Методы расчета температуры вентиляционного воздуха подземных сооружений. И.Д. Брайчева, В.П. Черняк, А.Н. Щербань.-Киев: Наукова думка, 1981.- 184 с.
2. . Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах/ А.Ф. Воропаев.- М.: Недра, 1968.- 256 с.
3. . Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников / Ю.Д. Дядькин.- Севена.- М.: Недра, 1968.- 256 с.
4. Щербань А.Н. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт/ Щербань А.Н., Кремнев О.А.- Т.1.- Киев: Изд. АН УССР, 1959.- 430 с.
5. Кремнев О.А. Тепло- и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях/ О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко.- Киев: Наукова думка,1980.- 320 с.
6. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков.- М.: Энергия, 1969.- 471 с.
7. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория теплопереноса / А.В. Лыков.- М. Госэнергоиздат, 1963.- 536 с.
8. Бай Ши-и. Турбулентное течение жидкостей и газов./ Бай-Ши-и .- М.: Изд. иностр. лит,1962.- 344 с.
9. Методы расчета турбулентных течений.- М.:Мир, 1984.- 464 с.
10. Гиневский А.С. Методы расчета турбулентного пограничного слоя / А.С. Гиневский, В.В. Иоселевич, А.В. Колесников. - М.: Энергия, 1978.- 420 с.
11. Турбулентность. Пер. с англ. Под ред. П.Брэдшоу.- М.: Машиностроение, 1980.- 343 с.
12. Турбулентность, принципы и применения. Пер. с англ. / Под ред. У.Форста, Т.Моулдена.- М.: Мир,1980.- 535 с.
13. Ушаков К.З. Аэромеханика вентиляционных потоков в горных выработках./ К.З. Ушаков.- М.: Недра,1975.- 167 с.
14. Федяевский К.К. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости./ К.К. Федяевский, А.С. Гиневский, А.В. Колесников - Л.: Судостроение, 1973.- 256 с.
15. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория./ И.О. Хинце. - М.: Физматгиз, 1963.- 680 с.
16. Шлихтинг Г. Возникновение турбулентности./ Г. Шлихтинг. - М.: Изд. иностр. лит., 1962.- 203 с.
- 17.Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. / Г. Шлихтинг. - М.:Наука,1969.- 742 с.
18. Шубауэр Г.Б. Турбулентное течение / Г.Б. Шубауэр, К.М. Чен // Турбулентное течение и теплопередача. Пер. с англ. /Под ред. Линь Цзя-цзяо.- М.: Изд. иностр. лит., 1963.- С. 83-205.
19. Nudins M. Evaluation of heat Transfer performances of round surfacas from experimental investigation in annual channels / M. Nudins // Int. j. Heat and Mass Transfer, 1979.- V. 22.- No 10.- P. 1381-1392.
20. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях / А.Дж. Рейнольдс - М.: Энергия, 1979.- 408 с.

Д-р техн. наук Д.М. Житленок
(ГП «Держинскуголь»),
мл. научн. сотр. Я.В. Шажко,
канд. техн. наук. В.В.Завражин
(ИФГП НАН Украины),
инж. Ш.В. Мамлеев
(ОП «Шахтерская-Глубокая»
ГП «Шахтерскантрацит»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОНОСНОСТИ И ДАВЛЕНИЯ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ

Проведена кількісна оцінка вмісту вільного і адсорбованого метану у відкритих порах і мікроблоках кам'яного вугілля насиченого метаном. Встановлено, що кількістю метану в транспортних каналах (порах) складає більше третини від загального вмісту у вугіллі. Обґрунтовано метод і засоби оцінки газоносності і тиску метану у вугіллі, заснований на особливостях газової емісії метану.

DETERMINATION OF GAS AND PRESSURE METHANE IN COAL SEAMS

The quantitative estimation of free and adsorbed methane in the open pores and microblocks coal saturated with methane. Found that the amount of methane in the transport channel (pore) is more than a third of the total content in the coal. Methods, and tools to evaluate gas content and pressure of methane in coal, based on the characteristics of methane gas.

Вопрос о залежах метана в угольных пластах, действующих и законсервированных, шахт до настоящего времени остается дискуссионным. Это, в первую очередь, связано с отсутствием методологии оценки количества метана с учетом его фазового состояния.

Существующие представления позволяют утверждать о наличии в угле трех фазовых состояний метана: свободный газ в порах и трещинах; в виде молекул, адсорбированных на поверхностях угля и в виде абсорбированных молекул в блоках угля с образованием твердого раствора метана в угле. При этом используются две основные модели описания системы «уголь-метан». Согласно одной из них [1], весь метан находится в свободном и адсорбированном состояниях, а насыщенность угля газом обеспечивается развитой сетью мелких открытых пор со значительной дисперсией их сечения. Недостатком модели являются трудности в объяснении продолжительности процесса десорбции метана из угля. Согласно указанным представлениям и теоретическим оценкам, коэффициент диффузии газа в самых мелких порах угля должен превышать значения $10^{-6} \div 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, в то время как, согласно эксперименту, этот коэффициент значительно меньше – $10^{-14} \div 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$ и характерен для диффузии в твердых телах.

Другая модель [2,3] является следствием развития представлений о блоковом строении угля. Экспериментальной основой для неё послужил сравнительный анализ кинетики выхода метана из угольных образцов, представляющих собой совокупность мельчайших образований – микроблоков, свободный объём