

В работе также исследованы значения числа  $Ra_{кр}$  при других значениях числа  $Re = hV_0/v_l$ . В результате получена следующая аппроксимационная функция для определения величины критического числа Рэлея:

$$Ra_{cr}^* = \frac{Ra_{cr}}{10^{10}} = 0,19 Re^{1/4} - 1,19. \quad (3)$$

Если теперь перейти в (3) от безразмерных физических величин к размерным и выразить скорость воздуха в стволе, мы получим:

$$V_{min} = \frac{v_l}{R} \left( \frac{g\beta\Delta TR^3}{0,19v_l\chi_l \cdot 10^{10}} + 6,26 \right)^4. \quad (4)$$

Скорость  $V_{min}$  можно интерпретировать как минимально допустимую скорость воздуха в шахтных стволах, при которой исключаются возвратные потоки воздуха и неконтролируемая рециркуляция воздуха. Эта функция может использоваться при проектировании систем вентиляции для сконструированных шахт и шахт в случае низких скоростей воздуха и значительного перепада температур  $\Delta T$  между воздухом и окружающей массой горных пород.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0145-С-01 (регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, №3. – С. 655-663.
2. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А., Накаряков Е.В. Исследование аэро- и термодинамических процессов, протекающих на начальном этапе организации сквозного проветривания рудника // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 21. – С. 367-377. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.9.
3. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Экспериментальное исследование изменения воздухораспределения на калийных рудниках при реверсировании главной вентиляторной установки // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14, № 17. – С.89-97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.10.
4. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горный журнал. – 2014. – №12. – С. 105-109.
5. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Устойчивость конвективного проветривания рудника после отключения вентилятора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 4. – С. 122-130. DOI: 10.15372/FTPRP120190413.

УДК 629.039.58

DOI:10.7242/echo.2020.2.24

### УСТОЙЧИВОСТЬ АДВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ С ИСТОЧНИКАМИ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА

А.В. Шалимов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Представлены результаты аналитических исследований развития пожара в горизонтальной горной выработке после отключения источника тяги. Показано, что однозначный прогноз движения воздуха в данном случае возможен только на основе теории устойчивости конвективных течений. В квазистационарной постановке проведено математическое моделирование ад-

вективного движения встречных потоков воздуха под действием горизонтального градиента температуры с использованием уравнений теплового баланса между источником тепловыделения, отвода тепла в породный массив и расходом энергии на преодоление аэродинамического сопротивления выработки. Доказано, что доля тепловой энергии, идущая на поддержание адвекции, неизмеримо мала по сравнению с её непосредственным уходом в массив в результате теплообмена. Интенсивность теплообмена воздуха со стенками выработки рассчитывалась с использованием эмпирических зависимостей для коэффициентов нестационарного теплообмена и теплоотдачи. Получены аналитические формулы для расчёта размера адвективного вихря и скорости движения воздуха в нём как функции времени и температуры горения в очаге пожара. Проведены количественные оценки этих величин при характерных значениях параметров задачи. Установлено, что дальность продвижения горячей струи воздуха в начале пожара слабо зависит от температуры горения, составляет около 100 метров и в случае продолжительного горения в течение 10 часов увеличивается до 300 метров. В качестве демонстрационного примера дана оценка продолжительности горения древесных материалов, которое без подачи свежего воздуха из других выработок выделяет 5 МВт тепловой энергии и прекращается из-за недостатка кислорода в течение получаса после сгорания двух кубометров древесины. Разработанная методика позволяет давать количественную оценку размера, скорости продвижения и продолжительности пожара в горизонтальной горной выработке после отключения источника тяги.

**Ключевые слова:** адвекция, температурный градиент, стратификация скорости, потеря устойчивости, депрессия, тепловая мощность, нестационарный теплообмен, число Грасгофа.

## Введение

Возгорания в условиях подземных рудников представляют огромную опасность для шахтёров. Рудничная атмосфера насыщается ядовитыми газами, горячий воздух и продукты горения быстро распространяются вентиляционной струёй по сети горных выработок, создавая новые очаги пожара при контакте с легко воспламеняющимися материалами. При обнаружении пожара, как правило, первой мерой по минимизации опасности и локализации участка возгорания является немедленное изменение режима вентиляции [1]. В случае возникновения пожара в горизонтальной выработке очевидным способом недопущения распространения огня и скорейшего прекращения горения является выключение вентилятора, в результате чего в выработку перестаёт поступать свежий воздух и поддерживать горение [2, 3]. Однако, несмотря на отсутствие общешахтной депрессии и тепловой депрессии, ввиду горизонтального расположения выработки появляется ещё один механизм движения воздуха – адвекция, избавиться от которой невозможно. Причиной адвективного движения воздуха является особый вид тепловой депрессии, приводящий к появлению замкнутого движения воздушных потоков навстречу друг другу под кровлей над почвой выработки с суммарным нулевым расходом по сечению. Таким образом, даже после отключения вентилятора горение может продолжаться некоторое время за счёт воздуха, содержащегося во всём объёме адвективного вихря. Продукты горения будут переноситься также на соответствующее расстояние от очага. Если это расстояние окажется больше, чем до места сопряжения с наклонной или вертикальной выработкой, то возникают риски появления «пожарной» тяги и проникновения огня в другие выработки, что значительно осложняет и ухудшает аварийную ситуацию [4].

## Математическая модель

Аналитическое моделирование процессов переноса тепла по горным выработкам основано, как правило, на одномерных моделях, в которых воздух по выработкам движется как единое целое [5]. Двумерная аналитическая модель конвективного расслоения потоков воздуха по сечению позволяет определить стратификацию скорости по высоте выработки [6]. Однако размер конвективного вихря в модели является неиз-

вестным параметром, что делает невозможным использование её для оценки величины зоны распространения пожара и времени его продолжительности после отключения вентилятора.

Проблема определения размера зоны распространения пожара в горизонтальной выработке при нулевой общешахтной депрессии за счёт адвекции заключается в неоднозначности выбора возможных стационарных решений. Очевидно, что из энергетического баланса тепловыделения от горения, поглощения тепла массивом и аэродинамических потерь при движении воздуха следует, что решений будет множество. Чем длиннее будет адвективный вихрь, тем медленнее будет двигаться воздух в нём. Какое из множества возможных замкнутых движений воздуха реализуется на практике зависит от их устойчивости к малым возмущениям потока [7-9].

Характерным безразмерным параметром задачи является число Грасгофа [10]

$$Gr = \frac{g\beta|\nabla T|h^4}{\nu^2} = \xi|\nabla T|, \quad (1)$$

$h$  – полувысота выработки (квадратного сечения) м;  $\nu$  – коэффициент турбулентной вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения воздуха, 1/°С;  $\nabla T$  — продольный градиент температуры воздуха, °С;

$$\xi = \frac{g\beta h^4}{\nu^2}, \text{ 1/°С.}$$

Предполагается, что градиент температур  $\nabla T$  не постоянен, а уменьшается линейно от максимального начального значения  $x=0$  ( $x$ , м – горизонтальная координата) в очаге пожара до минимального значения на расстоянии  $x=L$ , м, где происходит потеря устойчивости движения встречных потоков воздуха и образования замкнутого конвективного вихря размером  $L$ .

В линейном приближении зависимости плотности воздуха от температуры скорость его движения прямо пропорциональна среднему градиенту температуры  $\overline{\nabla T}$ , °С, т.е. средний объёмный расход  $\overline{Q}$ , м<sup>3</sup>/с (удвоенный по половине сечения) пропорционален среднему на участке  $[0; L]$  числу Грасгофа:

$$\overline{Q} \sim \overline{Gr} \quad (2)$$

с коэффициентом пропорциональности  $\frac{1}{6}\chi h$  (для плоского бесконечного слоя [11]), где  $\chi$  – коэффициент турбулентной температуропроводности, м<sup>2</sup>/с. Учитывая также, что адвективное движение воздуха вызывается тепловой мощностью пожара  $W$ , Вт за вычетом скорости его прямого оттока тепла в породный массив  $W'$ , Вт и скорости увеличения общего теплосодержания воздуха, которое при достижении стационарного режима обращается в ноль, можно заключить, что

$$rL\overline{Q}^3 = W - W', \quad (3)$$

где  $r$  – аэродинамическое сопротивление выработки на единицу длины, кг/м<sup>8</sup>. Предполагается, что  $W' \sim W \gg W - W'$ , т.е. основная часть энергии пожара идёт на нагрев породного массива, и лишь малая доля  $W$  тратится на движение воздуха. Поэтому в дальнейшем выделяющееся от вязкого трения тепло в тепловом балансе не учитывается.

Зависимость (2) с  $Q$  из (3) принимает вид

$$\overline{Gr} = \frac{1}{L} \int_0^L Gr(L, x) dx = \eta L^{-1/3}, \quad (4)$$

где  $\eta = \frac{6}{\chi h} \left( \frac{W - W'}{r} \right)^{1/3}$ .

Из нейтральной кривой устойчивости гидродинамической моды [12] следует, что потеря устойчивости наступает при уменьшении числа Грасгофа до соотношения

$$Gr(L, L) = \varepsilon \overline{Gr}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon \approx 0.4$ .

В предположении линейности по  $x$  профиля  $Gr(L, x)$  получается

$$Gr(L, x) = Gr(L, 0) - \left[ Gr(L, 0) - \varepsilon \frac{Gr(L, 0) + Gr(L, L)}{2} \right] \frac{x}{L}, \quad (6)$$

$$Gr(L, 0) = (2 - \varepsilon) \eta L^{-1/3}, \quad (7)$$

$$Gr(L, L) = \varepsilon \eta L^{-1/3}, \quad (8)$$

$$\overline{Gr}(L) = \eta L^{-1/3}. \quad (9)$$

Теперь, исходя из (1) и (6)-(9), можно перейти от чисел Грасгофа непосредственно к температуре воздуха, произведя интегрирование по  $x$ :

$$\xi T(L, x) = \xi T_0 - (2 - \varepsilon) \eta L^{-1/3} x + (1 - \varepsilon) \eta L^{-4/3} x^2, \quad (10)$$

$T_0$  – температура воздуха в очаге пожара, °С, .

На границе вихря  $x=L$  и из (10) следует

$$L = \left( \frac{\xi}{\eta} \Delta T \right)^{3/2}, \quad (11)$$

где  $\Delta T = T_0 - T(L, L)$  – перепад температур воздуха в начале и конце адвективного вихря и

$$\frac{\xi}{\eta} = \frac{1}{6} \frac{\chi g \beta h^5}{v^2} \left( \frac{r}{W - W'} \right)^{1/3}. \quad (12)$$

Предполагается, что  $T_0$  значительно превышает и начальную температуру массива и температуру в конце вихря. Поэтому можно принять  $T_0 \approx \Delta T$ .

При подстановке (3) в (12) и далее в (11)  $L$  выражается через  $\Delta T$  и скорость движения воздуха  $\omega = Q / (2h)^2$ , м/с

$$L = \frac{1}{24} \frac{\chi g \beta h^3}{v^2 \omega} \Delta T, \quad (13)$$

либо через  $\Delta T$  и  $W - W'$

$$L = \left( \frac{1}{6} \frac{\chi g \beta h^5}{\nu^2} \Delta T \right)^{3/2} \sqrt{\frac{r}{W - W'}} . \quad (14)$$

Баланс теплосодержания позволяет связать параметры ( $L$ ,  $\omega$ ,  $\Delta T$  и  $W - W'$ ) попарно.

Отток тепла  $W'$  в породный массив может быть вычислен как суммарная убыль теплосодержания в воздухе на всём пути движения воздуха

$$W' = 4h \int_0^L k_t T(L, x) dx , \quad (15)$$

$k_t$  – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·°С) [13].

Медленность процессов распространения тепла в породном массиве по сравнению с турбулентным конвективным теплопереносом в воздухе позволяет решать задачу в квазистационарной постановке. При подстановке (10) в (15)  $W'$  может быть выражена неявно через другую составляющую тепловой мощности пожара  $W - W'$ , идущую на поддержание адвективного движения воздуха

$$W' = 4k_t h L \left[ \Delta T - \frac{(4 - \varepsilon) \nu^2 L^{2/3}}{g \chi \beta h^5} \left( \frac{W - W'}{r} \right)^{1/3} \right] . \quad (16)$$

Скорость убыли теплосодержания единичного объёма воздуха при прохождении им участка от  $x=0$  до  $L$  составит

$$W'' = \frac{\rho c_v \Delta T \omega}{L} , \quad (17)$$

$\rho$  – средняя плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $c_v$  – удельная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·°С).

Из теплового баланса  $(2h)^2 L W'' = W'$  и (16) с использованием (13) и (14) для исключения  $\omega$  и  $W - W'$  следует зависимость  $L$  от  $\Delta T$

$$L = \frac{h^2}{2} \sqrt{\frac{g \beta \rho c_v}{(2 + \varepsilon) \nu k_t} \Delta T} . \quad (18)$$

Для определения величины  $k_t$  можно воспользоваться формулой Воропаева А.Ф. [14]

$$k_t = \frac{\rho c_v \chi \left( 1 + 0.274 \sqrt{\frac{\chi t}{h^2}} \right)}{0.88 \sqrt{\chi t + \rho c_v \chi / \alpha}} F(Fo, Bi) , \quad (19)$$

где  $Fo \equiv \frac{\chi t}{h^2}$  и  $Bi \equiv \frac{\alpha h}{\rho c_v \chi}$  – безразмерные критерии Фурье и Био,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (при  $t=0$  –  $k_t = \alpha$ ). Величина  $F$ , согласно утверждению автора, близка к единице в широком временном диапазоне  $t$  от 1 часа до 50 лет.

Экспериментальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  [14, 15] имеет вид (в СИ без соблюдения размерности):

$$\alpha = 3.4 \frac{\omega^{0.8}}{(2h)^{0.2}} \quad (20)$$

или с выражением  $\omega$  из (13) получается

$$\alpha = \bar{\alpha} \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0.8}, \quad (21)$$

где  $\bar{\alpha} = 3.4 \left( \frac{g\chi\beta h^3}{24\nu^2} \right)^{0.8} / (2h)^{0.2}$ .

## Результаты

При характерных значениях параметров задачи в СИ  $g=9.8$  м<sup>2</sup>/с;  $\beta=3.7 \cdot 10^{-3}$  °С<sup>-1</sup>;  $\rho=1$  кг/м<sup>3</sup>;  $c_v=1000$  Дж/(кг·°С);  $h=2$  м;  $\varepsilon=0.4$ ;  $\nu=0.05$  м<sup>2</sup>/с;  $\chi=0.08$  м<sup>2</sup>/с -  $\bar{\alpha}=1.5$ . При  $\Delta T \approx 1000$  °С в начальный момент времени  $L \approx 100$  м и  $\omega \approx 3$  м/с, в последующий час  $L$  увеличивается до 130 метров, а  $\omega$  падает до 2.5 м/с. С течением времени скорость движения воздуха падает, а размер вихря увеличивается по корневому закону. Через 10 часов пожара скорость упадёт до 1 м/с, а размер вихря увеличится до 300 метров.

Оценочный расчёт величины  $k_t$  показывает, что первое слагаемое в знаменателе (19) одного порядка со вторым при  $t \approx 1$  часа, значит в течение часа коэффициент теплообмена воздуха с породным массивом уменьшается в 2 раза. При подстановке (19) – (21) в (18) с  $F=1$  при  $t=0$  получается

$$L = \left( \frac{g\beta\rho c_v h^4}{4\nu(2+\varepsilon)} \right)^{5/6} (\Delta T)^{1/6}. \quad (22)$$

Зависимость  $L$  от  $\Delta T$  слабая – при изменении температуры от 500 до 1500 °С  $L$  меняется с 90 до 110 метров.

Оценить величину тепловыделения  $W$  можно, используя формулы (3) и (16). Из (3) следует, что  $W-W' \sim 10$  кВт, и по виду (16) можно заключить что первое слагаемое порядка 5 МВт, а второе в миллион раз меньше  $\sim 5$  Вт, что подтверждает сделанное в начале расчёта предположение, что  $W \gg W'$ . Таким образом, при заданных параметрах мощность пожара  $W$  порядка 5 МВт. Применительно к горению древесины при постоянной мощности тепловыделения на расстоянии 100 метров от очага пожара в обе стороны кислорода в воздухе хватит примерно на полчаса, что соответствует сгоранию около двух кубометров древесины.

## Выводы

Исходя из результатов представленной аналитической модели адвективного движения воздуха в горизонтальной горной выработке за счёт энергии источника выделения тепла внутри выработки, можно сделать следующие выводы:

- адвективный вихрь образуется в результате потери устойчивости движения встречных потоков воздуха;
- мощность локализованного источника горения не превышает 5 МВт, причём на поддержание замкнутого движения воздуха по выработке тратится лишь одна миллионная доля этой мощности, остальная идёт на нагрев породного массива;
- разворот воздушного потока происходит на расстоянии порядка 100 метров от очага пожара, величина которого имеет слабую зависимость от температуры горения, в диапазоне 10%;

- скорость движения воздуха в начальной стадии пожара составляет величину порядка 3 м/с и медленно убывает со временем по мере увеличения размера вихря;
- применительно к горению деревянных конструкций оценочное время пожара по кислородному фактору – полчаса с выгоранием двух кубометров древесины;
- если по каким-либо причинам доступ кислорода к очагу пожара прекращён не будет, то размер вихря будет увеличиваться с падением скорости движения воздуха в нём; через 10 часов пожара размер увеличится в 3 раза до 300 метров, а скорость упадёт в столько же раз до 1 м/с.

Представленная методика позволяет сделать количественную оценку размера, скорости продвижения и продолжительности пожара в горизонтальной горной выработке после отключения источника тяги.

*Работа выполнена при поддержке гранта по конкурсу фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 18-5-5-5), а также при поддержке Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0145-С-01 (регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Осипов С.Н., Жадан В.М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. – М.: Недра, 1973. – 150 с.
2. Шалимов А.В. Численное моделирование газоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 84-92.
3. Жуковец А.Н., Греков С.П., Чунту Г.Н. Расчёт изменения теплового поля в горных выработках за очагом пожара при закорачивании вентиляционных струй // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1972. – № 5. – С. 125-128.
4. Красноштейн А.Е., Казаков Б.П., Шалимов А.В. К моделированию сложных аэрогазотермодинамических процессов в атмосфере рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 6. – С. 105-111.
5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Ключкин Ю.А., Накаряков Е.В. Исследование аэро- и термодинамических процессов, протекающих на начальном этапе организации сквозного проветривания рудника // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 21. – С. 367-377. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.9.
6. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горный журнал. – 2014. – №12. – С. 105-109.
7. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М., Непомнящий А.А. Устойчивость конвективных течений. – М., Наука, 1989. – 320 с.: ил.
8. Semin M.A., Levin L.Y. Stability of air flows in mine ventilation networks // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – V. 124, Part B. – P. 167-171. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
9. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81-85.
10. Кафаров В.В. Основы массопередачи: Системы газ-жидкость, пар-жидкость, жидкость-жидкость. – 2-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 1972. – 494 с.: ил.
11. Бирих Р.В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости // Прикладная механика и теоретическая физика. – 1974. – №5. – С. 145-147.
12. Hart J.E. Stability of thin non-rotating Hadley circulation // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1972. – V. 29, №5. – P. 687-697.
13. Медведев Б.И., Почтаренко Н.С. Определение коэффициента нестационарного теплообмена для горных выработок при подземных пожарах // Разработка месторождений полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб.. – Киев, 1972. – Вып. 30. – С. 102-108.
14. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – С. 219.
15. Гендлер С.Г. Способ определения коэффициента теплоотдачи в горных выработках // Промышленная теплотехника. – 1986. – Т. 8, № 3. – С. 44-47.