

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ МАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В НАКЛОННОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ С ИСТОЧНИКОМ ВЫДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА

Шалимов А.В., Горный институт УрО РАН, Пермь

Жихарев С.Я., Горный институт УрО РАН, Пермь

Семи́н М.А., Горный институт УрО РАН, Пермь

Кузьминых Е.Г., Горный институт УрО РАН, Пермь

Проведен анализ возможностей масштабного моделирования нисходящего движения воздуха в наклонных выработках с источником выделения тепла в параметрической области неустойчивости воздушного потока. Установлено, что точно соблюсти подобие модели реальности в этой области можно только в рамках правил масштабирования Фруда с одинаковой температурой воздуха, которая в очаге пожара достигает 1500 К и более. Поскольку реализация такого нагрева воздуха в лабораторных условиях проблематична, предпринята попытка получения приближённых низкотемпературных масштабных соотношений на основании оценочных расчётов, ориентированных на желаемое снижение температуры в 3 раза при уменьшении геометрических размеров в 10 раз. Полученные зависимости верифицированы путём численного моделирования эффекта тепловой пробки в программном комплексе SolidWorks, а также на лабораторном имитационном стенде. Относительная погрешность определения точки опрокидывания воздушного потока тепловой депрессией в модельных и реальных масштабах составила 2%. Оба способа моделирования эффекта теплового запираания воздушного потока показали одинаковый динамический сценарий изменения направления его движения путём потери устойчивости, при котором опрокидывание потока происходит постепенно, с образованием крупномасштабных конвективных вихрей и разнонаправленной вертикальной стратификации скорости по сечению.

Ключевые слова: рудничные пожары, тепловая депрессия, устойчивость движения воздуха, адиабатические и изотермические границы, интенсивность тепловыделения, тепловая пробка, имитационный стенд, правила масштабирования

Введение

Рудничные пожары являются одним из наиболее распространённых и опасных видов аварий на горнодобывающих предприятиях, представляя непосредственную угрозу жизни горнорабочих. Основную опасность представляют собой вредные для дыхания продукты горения, которые распространяются от очага горения по горным выработкам по ходу движения воздуха [1-3]. Соответственно, вывод людей на поверхность в целях безопасности должен быть организован в противоположном направлении, чтобы исключить их проход через задымлённые участки [4, 5]. Имеет значение также скорость воздушных потоков, т.к. даже при выходе людей в правильном направлении непригодный для дыхания воздух может настигнуть их до того, как они выйдут на поверхность. В этой связи точный прогноз пожарного воздухораспределения в руднике является актуальной задачей, результаты решения которой востребованы при составлении планов ликвидации аварий. К сожалению, задача эта простого решения не имеет по причине того, что возникающие во время пожара в негоризонтальных выработках тепловые де-

прессии изменяют заданное вентиляторами воздухораспределение не только по величине скоростей движения воздушных потоков, но и отчасти по их направлениям. Особенно велика эта неопределённость в нулевом режиме вентиляции, используемом при возникновении подземного пожара для предотвращения поступления свежего воздуха к его очагу, когда отключаются вентиляторы главного проветривания [6]. Теоретические методы позволяют осуществлять моделирование расходов воздуха в шахтной сети в одномерной постановке в предположении однонаправленного движения воздуха по выработке. Это условие выполняется при невысоких перепадах температур, т.е. на значительном расстоянии от очага пожара, где воздух уже достаточно остыл и не имеет ярко выраженной плотностной стратификации по высоте выработки. Однако основной причиной тепловой депрессии является именно очаг пожара, и, если он расположен в наклонной выработке, то одномерное моделирование движения воздуха для оценки величины возникающей депрессии в этом случае не соответствует реальности. Если же до нагрева воздух по наклонной выработке движется сверху вниз, то проблематичным оказывается прогноз не только изменения скорости его движения, но и направления, т.к. тепловая депрессия может передавить падение общешахтной на этом участке [7].

Для решения проблемы прогнозирования устойчивости воздушных потоков в подобных случаях наряду с широко используемыми в настоящее время методами численного моделирования [8-11] можно и нужно, для верификации теоретических прогнозов, использовать результаты лабораторного моделирования [12]. Натурные эксперименты проводятся не часто, т.к. возможности их организации для верификации численных моделей ограничены правилами безопасности [13, 14]. При моделировании полей скоростей движения и температур воздуха во время пожаров в замкнутых пространствах широко используется метод масштабирования Фруда, позволяющий экспериментальным путём в уменьшенных лабораторных размерах получить результаты, подобные полномасштабным, и на их основании осуществить прогноз параметров реального пожара [15-17]. Недостатком этого способа моделирования является необходимость обеспечения равенства температур воздуха в реальности и модели для соблюдения подобия, что сильно ограничивает возможности такого моделирования. В реальных условиях рудника температура воздуха вблизи очага пожара достигает довольно высоких значений, порядка 1200°C , особенно при опрокидывании воздушного потока тепловой депрессией, когда вынос тепла из выработки близок к нулю. Нагрев воздуха до такой температуры на лабораторном стенде технически не представляется возможным, поскольку работоспособность измерительной аппаратуры для фиксации опытных результатов ограничена значительно меньшими значениями температур, порядка 300°C . В связи с этим существует необходимость разработки способа низкотемпературного моделирования рудничного пожара, которое позволило бы осуществлять прогноз параметров воздушных потоков вблизи очага горения на основании результатов лабораторных экспериментов на стенде в уменьшенном размере при более низких температурах. В работе [18] на основе метода размерностей была предпринята попытка разработки правил подобного низкотемпературного масштабирования, которое показало хорошее соответствие температур воздуха в модели и в реальности, но значение модельной массовой скорости движения воздуха оказалось занижено в 2 раза. Кроме того, для моделирования теплового запыления и потери устойчивости воздушного потока такой способ масштабирования не годится, поскольку предполагает уменьшение перепадов давлений и температур при переходе от реальных к модельным размерам в одинаковых пропорциях. Это увеличивает погрешность моделирования при малых значениях

расходов воздуха вблизи точки теплового записания потока и исключает возможность подобия границ устойчивости воздушных потоков в реальности и в модели.

Следует отметить, что ни с помощью анализа размерностей, ни составлением системы дифференциальных уравнений состояния воздуха в безразмерной форме не удаётся получить набор критериев подобия, обеспечивающих низкотемпературное подобие пожара в реальной горной выработке и в её уменьшенной модели с приемлемой точностью в области параметров, близкой к тепловому записанию воздушного потока. Метод масштабирования Фруда такую точность моделирования обеспечивает, но только при условии равенства температур воздуха в реальности и в модели, что технически не реализуемо при высоких температурах. В данной статье предлагается способ решения этой проблемы не соблюдением подобия моделируемых процессов реальным с выявлением безразмерных комплексов подобия, а составлением оценочных физических соотношений с последующей численной и экспериментальной верификациями полученных масштабных зависимостей. Суть этого методического приёма моделирования заключается в том, что при невозможности строгого вывода универсальных соотношений подобия для исследуемого процесса, масштабирование производится приближённо в ограниченной интересами исследований области параметров с подбором эмпирических коэффициентов и последующей проверкой их значений.

Аналитический вывод масштабных соотношений

Анализ уравнения состояния реального газа Ван-дер-Ваальса показывает, что для воздуха в условиях рудничного пожара относительная погрешность приближения идеального газа не превышает 0.5%, поэтому в уточнении этого приближения необходимости нет. Кроме того, учитывая, что тепловые депрессии и падения общешахтной депрессии на выработках значительно ниже значения абсолютного атмосферного давления, составляющего ~ 100000 Па, процесс движения воздуха по выработке можно приближённо считать изобарическим

$$\rho T = \rho_0 T_0, \quad (1)$$

где ρ_0 , T_0 – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, и температура, К, воздуха в выработке до начала выделения тепла, предполагаются постоянными по длине выработки, а также равными в реальности и модели; ρ и T – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, и температура, К, воздуха в выработке после нагрева. Устойчивость движения воздуха вниз по наклонной выработке с источником выделения тепла теряется тогда, когда возникающая тепловая депрессия $\Delta P_t < 0$, Па приближается по модулю к падению общешахтной депрессии на этой выработке $\Delta P_0 > 0$, Па,

$$\Delta P_0 \sim |\Delta P_t| \sim (\rho_0 - \rho) g H, \quad (2)$$

$g = 9.8 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения, H – разница высотных отметок узлов наклонной выработки, м, ρ – характерная плотность воздуха после нагрева, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Нагрев воздуха при движении его по выработке определяется в адиабатическом приближении, т.е. предполагается, что всё выделяющееся тепло идёт на нагрев воздуха и по ходу его движения в породный массив не уходит

$$\omega = c_p \rho V \Delta T, \quad (3)$$

ω – выделение тепла в единицу времени с единицы поверхности выработки (предполагается сосредоточенный источник тепла в центре выработки), $\text{Вт}/\text{м}^2$, c_p – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, V – средняя по

сечению выработки скорость движения воздуха, м/с, $\Delta T = T - T_0$ – среднее по сечению выработки изменение температуры воздуха в результате его нагрева, К. Если учесть, что значительно больше выделяемого тепла при пожаре выносится из выработки, чем уходит в породный массив, то отказ от адиабатического приближения, сделанный в (3), возможно, не окажет заметного влияния на результаты (будет проверено далее численным моделированием), и полученные правила масштабирования будут выполняться и для не теплоизолированных границ. Отток тепла в породу в этом случае может быть смоделирован уменьшением интенсивности выделения тепла ω на часть, уходящую в окружающий породный массив.

Если подставить (1) в (2), опустить одинаковые в реальности и модели параметры g , ρ_0 и T_0 и учесть, что при соблюдении геометрического подобия соотношения H и поперечного размера выработки D , м, одинаковы, то получается

$$\Delta P_0 \sim |\Delta P_t| \sim D \frac{\Delta T}{T}. \quad (4)$$

Из курса гидравлики известно, что при движении жидкости по трубе длиной L , м, и диаметром D , м, падение давления ΔP_0 , Па, зависит от скорости V_0 , м/с, квадратично

$$\Delta P_0 \sim \frac{L}{D} V_0^2, \quad (5)$$

что справедливо также и для движения воздуха по выработкам со сквозным проветриванием и используется при проектировании систем рудничной вентиляции, V_0 – скорость движения воздуха по выработке до возникновения пожара, м/с. Поскольку $|\Delta P_t| \sim \Delta P_0$, и ищутся условия теплового подобия между горной выработкой и её уменьшенной модельной копией, то следует ожидать, что и суммарное падение давления ΔP , Па, с одной стороны также квадратично зависит от скорости, как в (5), с другой стороны, сумма оценивается по её слагаемым, а значит, для неё также справедливо (4)

$$|\Delta P| = |\Delta P_0 + \Delta P_t| \sim \frac{L}{D} V^2 \sim D \frac{\Delta T}{T}, \quad (6)$$

L – длина выработки, м. Соотношение L/D можно опустить, т.к. при соблюдении геометрического подобия оно постоянно. Теперь, если из (6) выразить V , а из (1) выразить ρ , через $\Delta T/T$, и подставить в (3), то ω принимает аналогичный (4) вид

$$\omega \sim \sqrt{D} \left(\frac{\Delta T}{T} \right)^{3/2}. \quad (7)$$

По виду (4) и (7) можно заключить, что безразмерным параметром, определяющим тепловое подобие вблизи точки опрокидывания воздушного потока тепловой депрессией, является отношение $\Delta T/T$. Для получения искомых правил масштабирования необходимо выяснить, как этот параметр зависит от характерного геометрического размера D . В качестве искомой можно использовать степенную зависимость:

$$\frac{\Delta T_r}{T_r} \Big/ \frac{\Delta T_m}{T_m} = \frac{1 - T_0/T_r}{1 - T_0/T_m} = \left(\frac{D_r}{D_m} \right)^n, \quad (8)$$

здесь T_r , D_r и T_m , D_m – температуры воздуха, К, и поперечные размеры, м, горной выработки (индекс r) и её модели (индекс m) соответственно, n – подлежащий определению безразмерный степенной параметр масштабирования. Не сложно убедиться, что при $n=0$ (4) и (7) дают правила масштабирования Фруда с одинаковыми температурами воздуха в

реальности T_r и модели T_m . Поскольку речь идёт о моделировании пожара, то создание столь высоких температур воздуха в лабораторных условиях, с возможностью наблюдения движения и измерения термодинамических параметров воздушных потоков, практически не реализуемо. Однако возможность варьирования значения n позволяет подобрать его так, чтобы обеспечить приемлемое снижение температуры воздуха при уменьшении геометрических размеров стенда по сравнению с реальной горной выработкой. Очевидно, что модельное снижение температуры воздуха не должно быть чрезмерным, т.к. чем меньше перепад температур, тем медленнее движение воздуха, и тем больше будет погрешность экспериментальных данных из-за малой величины конвективных сил.

Характерные значения параметров: размеры модели – в 10 раз меньше размеров горной выработки, т. е. $D_r/D_m = 10$; начальная температура воздуха $T_0 \sim 300$ К; температура воздуха в очаге пожара в выработке $T_r \sim 1500$ К; оптимальное для лабораторных условий значение температуры воздуха в модели $T_m \sim 500$ К. Подстановка этих параметров в (8) даёт $\frac{\Delta T_r}{T_r} / \frac{\Delta T_m}{T_m} \sim 2$ и значение $n = \lg(2) \approx 0.3$, значит, первое масштабное соотношение имеет вид

$$\frac{\Delta T_r}{T_r} / \frac{\Delta T_m}{T_m} = \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right) / \left(1 - \frac{T_0}{T_m}\right) \sim \left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{0.3}. \quad (9)$$

Подстановка (9) в (7), (4) и (6) даёт остальные правила масштабирования для задаваемых (ω , ΔP_0 или V_0) и искомых параметров (ΔP , V)

$$\frac{\omega_r}{\omega_m} \sim \left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{0.95}; \quad \frac{(\Delta P_0)_r}{(\Delta P_0)_m}, \frac{|\Delta P_r|}{|\Delta P_m|} \sim \left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{1.3}; \quad \frac{(V_0)_r}{(V_0)_m}, \frac{|V_r|}{|V_m|} \sim \left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{0.65}. \quad (10)$$

Отличительной особенностью данного способа масштабирования является соотношение (9), в котором масштабная пропорция накладывается не на температуру T или перепад температур воздуха ΔT , а на их отношение.

Верификация правил масштабирования путём численного моделирования

При верификации представленной методики масштабирования с помощью численного моделирования параметров воздушного потока во время пожара в наклонной горной выработке в программном комплексе SolidWorks рассмотрены два масштаба: реальный (5 м (D_r – ширина выработки по x , м) x 3 м (h_r – высота выработки по y , м) x 200 м (L_r – длина выработки по z , м)) и модельный (0.5 м (D_m) x 0.3 (h_m) м x 20 м (L_m), уменьшенный в 10 раз).

Начальная стадия пожара с интенсивным отводом тепла в массив моделировалась заданием изотермических границ выработки с температурой воздуха до возгорания. Задание адиабатических граничных условий соответствовало другому предельному случаю – стадии продолжительного пожара, при котором окружающий выработку породный массив в достаточной степени прогрелся, в результате чего образовалась теплоуравнивающая оболочка, в значительной мере уменьшающая интенсивность отвода тепла в массив по сравнению с начальной стадией пожара.

В качестве характерного поперечного размера принята ширина выработки D , наклон выработки – 12 градусов ($g_y = -9.6$ м/с²; $g_z = 2.0$ м/с²), температура наружного воздуха $+20^\circ\text{C} = 293.2$ К, источник выделения тепла W (кВт) считается протяжённым с максимальной интенсивностью по центру выработки. Имитируя горение конвейер-

ной ленты, тепловыделение задаётся распределённой по почве выработки экспоненциальной зависимостью $W = \omega \cdot \exp(-(z/\zeta)^2)$, где ω – равномерная по x плотность выделения тепла (кВт/м²) с поверхности почвы, 2ζ – протяжённость источника (ζ (м) – расстояние вдоль выработки, на котором ω уменьшается в e раз от максимального значения в $z = 0$). Ввиду того, что протяжённость выработки намного больше поперечного размера, значение W можно вычислить интегрированием в бесконечных пределах по z

$$W = \zeta D \omega \sqrt{\pi},$$

при соотношении масштабов реальной выработки к её модели 10:1 принято $\zeta_r = 10$ м и $\zeta_m = 1$ м.

Численное моделирование в приближении интенсивного теплообмена со стенками (изотермические границы с фиксированной температурой T_0) показало, что с выходом на стационарный режим движения воздуха эффект тепловой пробки в модельных масштабах возникает в интервале $(\Delta P_0)_m$ от 5 до 5.5 Па ($(V_0)_m$ от 2.2 до 2.3 м/с), в котором возникает неустойчивость и опрокидывание воздушного потока. При понижении начального перепада давлений на 0.5 Па происходит опрокидывание воздушного потока тепловой депрессией, что на расчётных рисунках характеризуется сменой окраски с красной (положительная скорость) на синюю (отрицательная скорость). В реальном масштабе этот интервал $(\Delta P_0)_r$ составляет от 100 до 105 Па ($(V_0)_r$ от 10.4 до 10.7 м/с). Расчётные значения продольной скорости движения воздуха $(V_z)_m$ и $(V_z)_r$, м/с и безразмерных температурных параметров $\Delta T_m/T_m$ и $\Delta T_r/T_r$ при потере устойчивости движения воздушного потока представлены на рис. 1 и 2.

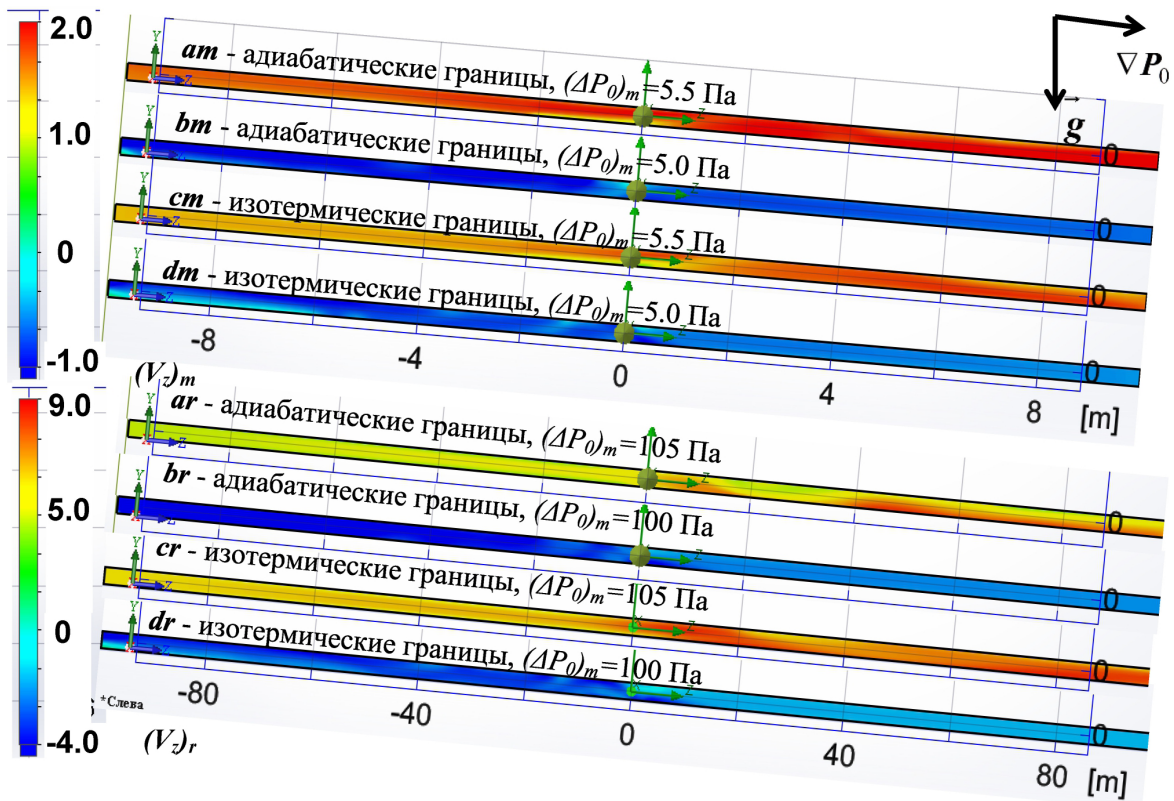


Рис. 1. Результаты численного моделирования продольной скорости движения воздуха V_z при разных напорах источника тяги ΔP_0 с двух сторон точки опрокидывания воздушного потока тепловой депрессией в модельном и реальном масштабах

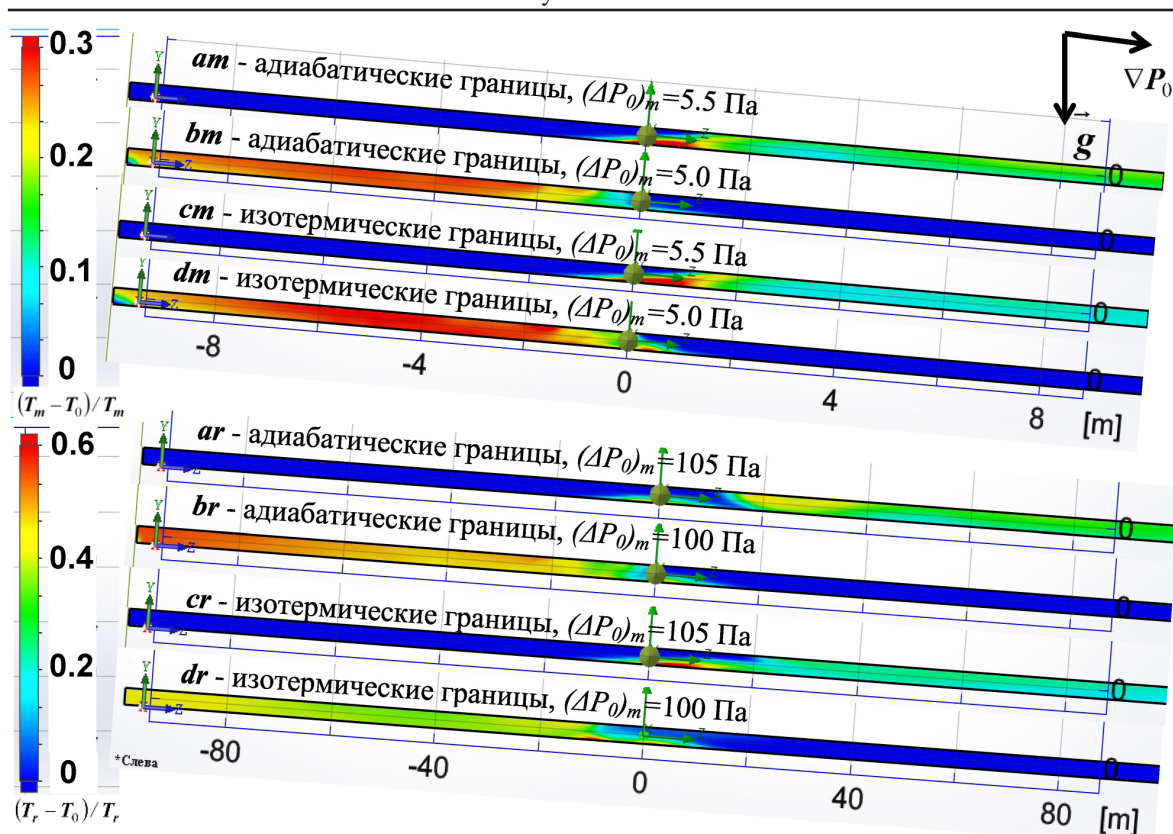


Рис. 2. Результаты численного моделирования безразмерного температурного параметра $(T-T_0)/T$ при разных напорах источника тяги ΔP_0 с двух сторон точки опрокидывания воздушного потока тепловой депрессией в модельном и реальном масштабах

Для проверки представленных в статье правил масштабирования размеры выработки были увеличены в 10 раз, а интенсивность выделения тепла ω и напор ΔP_0 изменены в соответствии с масштабными соотношениями (10): $\omega_r = 100.53 \approx 100$ кВт/м², $(\Delta P_0)_r$ увеличено по сравнению с $(\Delta P_0)_m$ в $10^{1.3} \approx 20$ раз - $100 \div 110$ Па. Округлённый до целых значений пересчёт пределов легенд на рис. 1 и 2 по соотношениям (9)-(10) для искомых параметров V_z и $\Delta T/T$ даёт: $(V_z)_m$ (-1 м/с; 2 м/с) \rightarrow $(V_z)_r$ (-4 м/с; 9 м/с); $(\Delta T/T)_m$ (0; 0.3) \rightarrow $(\Delta T/T)_r$ (0; 0.6). Чем лучше соответствие расчётных результатов, представленных цветовой раскраской, тем лучше соблюдено подобие разработанными правилами масштабирования (9)-(10).

Анализ результатов численной проверки правил масштабирования

Оценка погрешности правил масштабирования для определения точки потери устойчивости производилась уменьшением интенсивности тепловыделения $\omega_r = 100$ кВт/м² с шагом 0.5 кВт до опрокидывания потока и восстановления его нисходящего движения. Изменение направления потока воздуха произошло ниже значения $\omega_r = 98.0$ кВт/м², что даже не в адиабатических условиях свидетельствует о невысокой относительной погрешности определения критического значения интенсивности тепловыделения $\sim 2\%$, при котором теряется устойчивость движения воздуха по выработке. Этот результат подтверждает также сделанное предположение о том, что значительно больше выделяемого тепла выносится из выработки, чем уходит в породный массив. При этом

значении ω_r , расчётные результаты для изотермических и адиабатических граничных условий практически не отличаются, т.к. опрокидывание воздушного потока со снижением интенсивности тепловыделения происходит, как показали численные эксперименты, именно путём потери устойчивости направления движения воздуха, а не постепенно. Относительная погрешность определения скорости движения воздуха оказалась не малой, $\sim 50\%$, однако рассчитывать на получение лучшего результата в параметрической области неустойчивого расхода не приходится, поскольку изменение величины и направления скорости в этой области происходит при малейшем изменении параметров. В отношении температуры, судя по результатам, можно сказать, что на достаточном удалении от источника выделения тепла температуры воздуха соответствуют правилу масштабирования (9), но вблизи источника в уменьшенной модели воздух остывает медленнее, чем в полномасштабной. Отличие это более отчётливо выражено в варианте с изотермическими границами, что ожидаемо, поскольку соотношения (9)-(10) были выведены в адиабатическом приближении. Интенсивность теплообмена со стенками тем выше, чем больше перепад температур, поэтому в полномасштабной модели с большим перепадом температур интенсивность теплообмена вблизи источника горения выше.

Можно оценить также, какой выигрыш даёт представленный способ низкотемпературного масштабирования в отношении понижения температуры в модели. Несложно выразить ΔT через безразмерный параметр $\Delta T/T$, исходя из того, что $\Delta T = T - T_0$

$$\Delta T = T_0 \frac{\Delta T/T}{1 - \Delta T/T},$$

откуда характерные значения расчётных перепадов температур составляют для изотермических границ порядка $\Delta T_m = 100$ К и $\Delta T_r = 200$ К, а для адиабатических границ – порядка $\Delta T_m = 100$ К и $\Delta T_r = 300$ К, что соответствует модельному понижению перепада температур приблизительно в 2-3 раза, абсолютной температуры – в 1.25-1.5 раза. Представленные результаты проведённого численного моделирования эффекта тепловой пробки соответствуют сценарию слабого пожара в горной выработке, при котором температура воздуха не поднимается выше 600°C . Расчётный вариант с адиабатическими границами подтверждает масштабное соотношение (9).

Результаты моделирования эффекта тепловой пробки на имитационном стенде

Экспериментальное моделирование тепловой пробки проводилось на изготовленном из оцинкованных металлических воздухопроводов имитационном физическом стенде высотой 0.3 м, шириной 0.5 м и длиной 10 м (рис. 3). После канального вентилятора в стенде установлен тройник (ответвление № 1), имитирующий сопряжение с другой горной выработкой. Нагрев воздуха осуществлялся канальным калорифером, расположенным в центральной части стенда. Нагревательные элементы калорифера для обеспечения лучшего теплообмена были расположены поперёк воздушного потока, обеспечивая его нагрев по всему сечению канала [19, 20].

Такой способ нагрева воздуха отличается от распределённого по поверхности, рассмотренного выше при численном моделировании, и имитирует другой вид рудничного пожара с локализованным объёмным источником, например, горячей машиной. Такой вид выделения тепла, в отличие от протяжённого поверхностного,

даёт большую крупномасштабную турбулизацию воздушного потока, что увеличивает аэродинамическое сопротивление канала и, соответственно, средняя по сечению скорость движения воздуха уменьшается [21]. Исследование эффекта запирания воздушного потока тепловой депрессией при таком виде пожара проводилось путём измерения полей скорости движения и температуры воздуха в двух сечениях стенда, изображённых на рис. 3, а также перепада давления на герметичном участке стенда между первым и третьим сечениями. Первое и второе сечения располагались на расстоянии 1.2 м до и после канального калорифера в зоне смотровых окон. Каждое исследуемое сечение было разделено на три вертикальных линии по ширине и пять горизонтальных линий по высоте, пересечения которых являлись контрольными точками, где производились измерения величин перечисленных параметров.

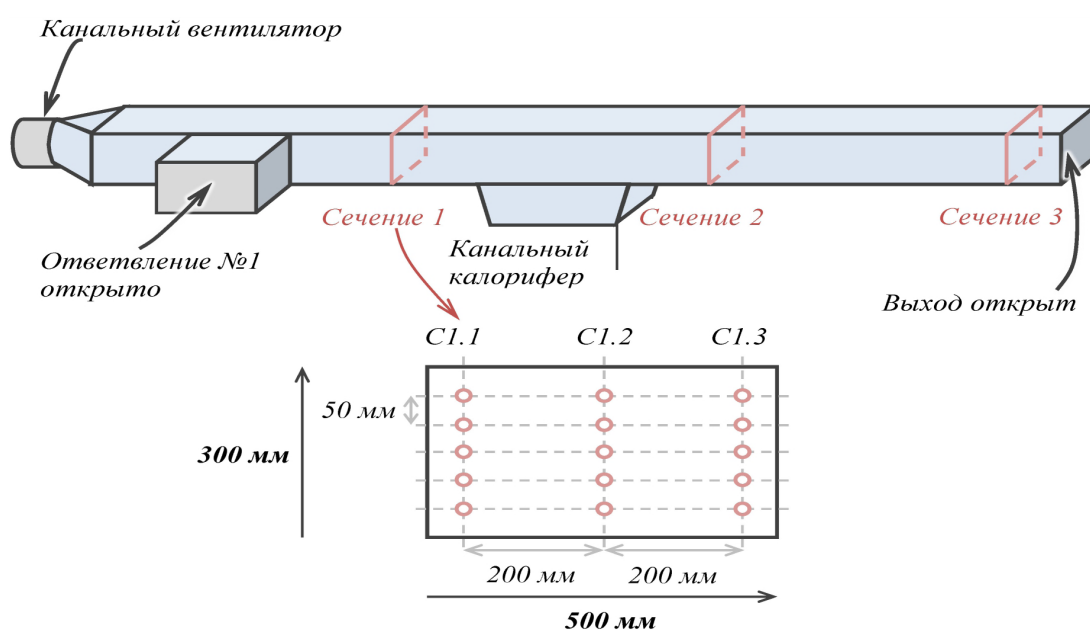


Рис. 3. Схема испытательного стенда с размерами и контрольными точками для измерения параметров воздушного потока

Визуальная фиксация момента опрокидывания воздушного потока тепловой депрессией при мощности калорифера $W_m = 8$ кВт осуществлялась через смотровые окна испытательного стенда при его наклоне в 8 градусов с нисходящим движением воздуха. Частота вращения канального вентилятора постепенно уменьшалась до остановки и опрокидывания потока.

Неопределённым параметром в этом эксперименте являлся перепад давлений, уравнивающий тепловую депрессию, поэтому при численном моделировании наступления теплового запирания (тепловой пробки) воздушного потока в таком же масштабе он являлся подбираемым параметром. Соответствующий возникновению тепловой пробки перепад давлений, измеренный между первым и третьим сечениями, составил ~ 2 Па, что, с учётом погрешности измерительного прибора, согласуется с результатами численного моделирования. Определения перепада давления на участках имитационного стенда выполнены при помощи измерителя дифференциального давления Fluke 922 с диапазоном измерения от 0 до 4000 Па с разрешающей способностью 1 Па и абсолютной погрешностью $\pm 1\%$.

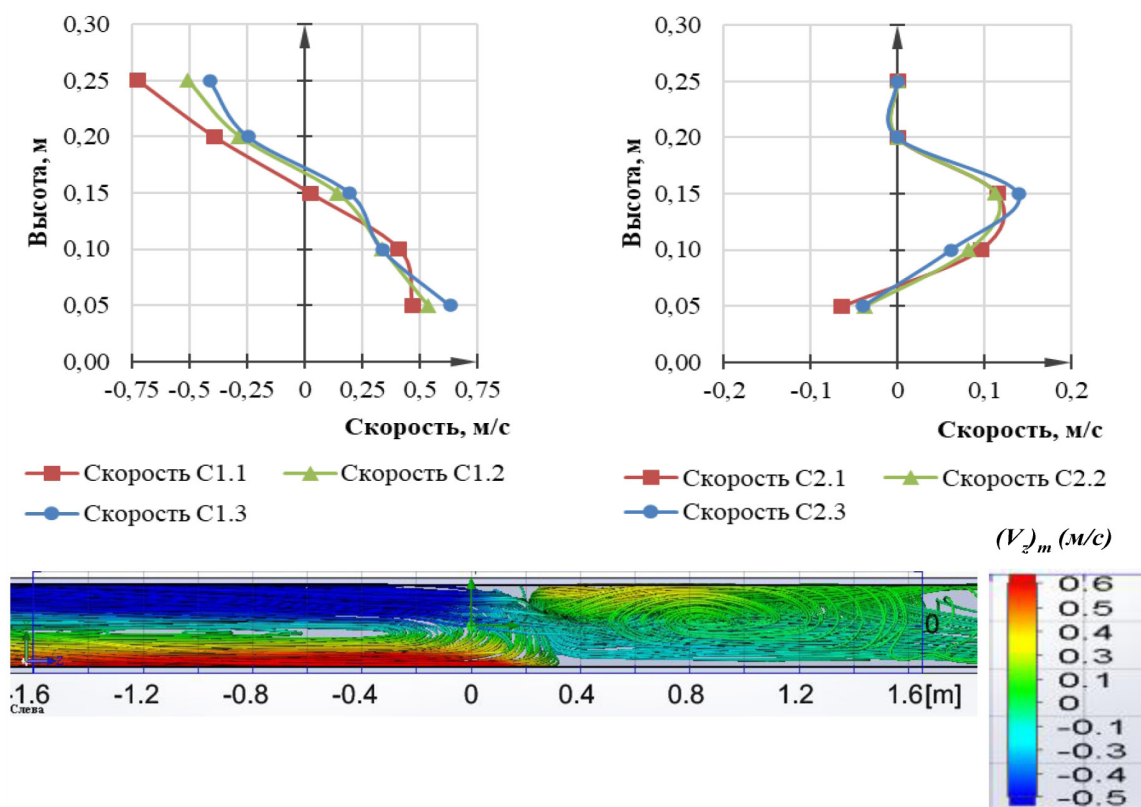


Рис. 4. Распределение скоростей движения воздуха по результатам замеров и численного моделирования

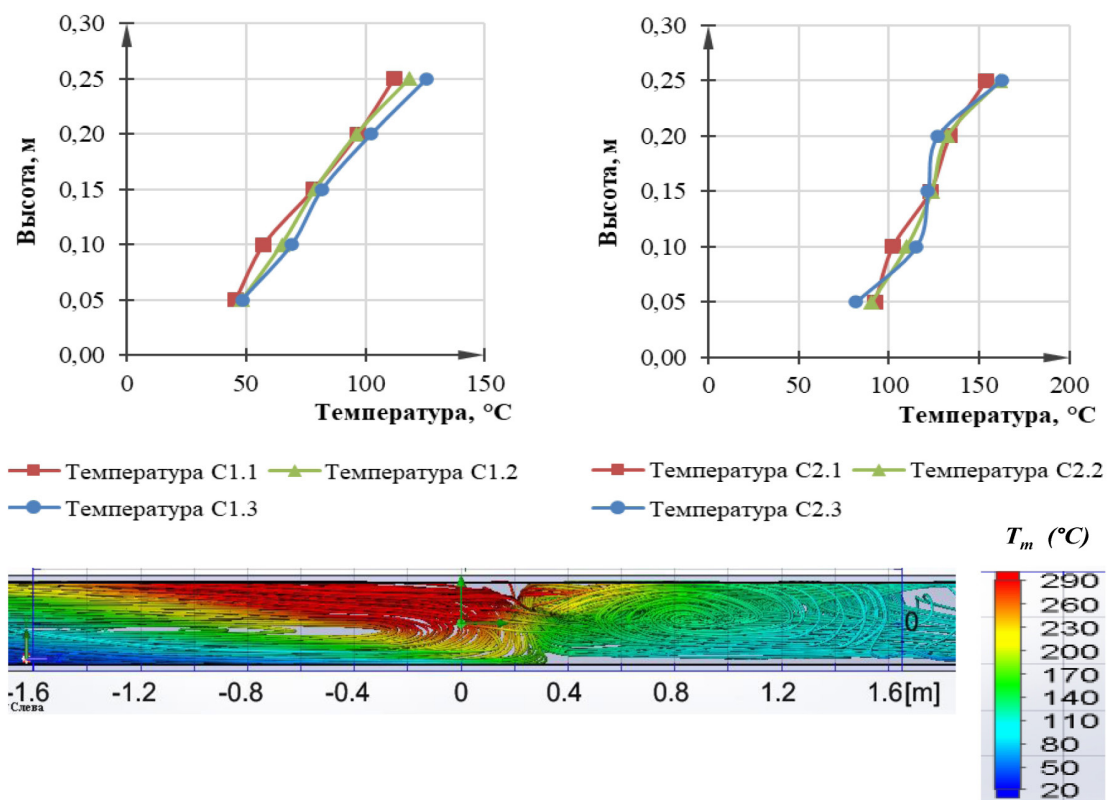


Рис. 5. Распределение температуры воздуха по результатам замеров и численного моделирования

Результаты измерения скорости и температуры воздуха в процессе формирования тепловой пробки в сечениях 1 и 2 спустя 1 минуту с начала выделения тепла, а также результаты численного моделирования этих параметров представлены на рис. 4 и 5. Расчёт на более длительных промежутках времени с близкими значениями начального перепада давлений показал, что эффект тепловой пробки с разнонаправленным движением воздуха в сечении неустойчив, длится порядка нескольких минут, после чего устанавливается одно направленное движения воздуха в ту или иную сторону.

По результатам проведения численных экспериментов был установлен следующий динамический сценарий возникновения и разрушения тепловой пробки. При начальном напоре 1.5 Па на герметичном участке стенда после включения источника выделения тепла нагретый воздух с меньшей плотностью двигается вниз, создавая тепловой напор противоположного направления. В результате скорость движения воздуха уменьшается, а значит, с уменьшением расхода увеличивается его нагрев, что ещё больше увеличивает тепловой напор и тормозит воздушный поток. Однако подобранного напора источника тяги в 1.5 Па всё же хватает для того, чтобы сохранить первоначальное направление движения воздуха вниз, даже после достижения им минимальной скорости и максимальной температуры. Это состояние возникает приблизительно через минуту после включения нагревателя и практически не изменяется в течении нескольких минут, поскольку в обратную сторону от нагревателя против воздушного потока за пределами конвективных вихрей тепло распространяется за счёт турбулентной теплопроводности с гораздо меньшей скоростью, чем конвективным переносом. Тем не менее, этот перенос тепла происходит, величина тепловой депрессии (отрицательный напор) достигает критического значения, превышающего первоначальный напор, и струя опрокидывается. После этого тепловая депрессия начинает прирастать за счёт конвективного нагрева воздуха с другой стороны нагревателя, но уменьшаться за счёт поступления плотного холодного воздуха снизу. В рассмотренном случае опрокидывание воздуха потока произошло с выходом на стационарный режим. В другой параметрической области наблюдались также колебательные сценарии движения воздуха, когда струя опрокидывалась несколько раз, прежде чем происходил выход на стационарный режим.

Заключение

По результатам проведённых теоретических и лабораторных исследований возникновения эффекта тепловой пробки в наклонной горной выработке можно сделать следующие выводы:

- точное соблюдение подобия модели реальной горной выработки в параметрической области теплового запираания воздушного потока возможно только в рамках правил масштабирования Фруда с одинаковыми значениями температуры воздуха, что в лабораторных условиях не реализуемо технически, по причине слишком высоких значений температуры воздуха вблизи очага рудничного пожара;
- низкотемпературные правила масштабирования в геометрических пропорциях 1 к 10 с целевым снижением температуры воздуха в 3 раза, полученные на основании физических приближений идеального газа и адиабатических границ, дают относительную погрешность определения критического для опрокидывания потока значения интенсивности тепловыделения в 2%;

– при несоблюдении адиабатического приближения в условиях изотермических границ погрешность низкотемпературного масштабирования изменяется незначительно, но выигрыш в модельном снижении температуры воздуха уменьшается;

– состояние тепловой пробки возникает не сразу после возникновения пожара в наклонной выработке, путём постепенного уменьшения расхода и увеличения температуры воздуха, держится некоторое время и разрушается из-за потери устойчивости с опрокидыванием воздушного потока.

Представленные в статье низкотемпературные правила масштабирования дают возможность осуществлять прогноз устойчивости проветривания горных выработок во время рудничных пожаров на основе моделирования воздушных потоков вблизи очагов возгорания в лабораторных условиях.

Библиографический список

1. *Осипов С. Н., Жадан В. М.* Вентиляция шахт при подземных пожарах. – М.: Недра, 1973. – 152 с.
2. *Хацько М. С., Онищенко С. А.* Разработка комплекса мероприятий по снижению рисков возникновения чрезвычайных ситуаций на шахте // Современные исследования в науках о Земле: ретроспектива, актуальные тренды и перспективы внедрения. Материалы III Международной научно-практической конференции / редкол.: Н. С. Шуваев, Е. А. Колчин – Астрахань. – 2021. – С. 46–49.
3. *Родионов В. А., Серегин А. С., Иконников Д. А.* Мультипликативный метод оценки взрывопожароопасных свойств рудничной атмосферы при поступлении в воздушную среду углеводородных газов // Горный журнал. - 2023. - № 9. - С. 35-40. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05.
4. *Onifade M., Genc B., Said K. O., Fourie M., Akinseye P. O.* Overview of mine rescue approaches for underground coal fires: A South African perspective. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2022, vol. 122, no. 5, pp. 213-226. DOI: 10.17159/2411-9717/1738/2022.
5. *Chen Y., Liu J., Zhou Q., Liu L., Wang D.* A study on rapid simulation of mine roadway fires for emergency decision-making. *Scientific reports*, 2024, vol. 14, no. 1, 1674 p. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3573985/v1.
6. *Шалимов А. В., Кормщиков Д. С., Попов М. Д.* Определение показателя конвективной устойчивости воздуха в стволах при нулевом режиме вентиляции рудника // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 89-97. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4701.
7. *Salami O. B., Xu G., Kumar A. R., Pushparaj R. I.* Underground mining fire hazards and optimization of emergency evacuation strategies: The issues, existing methodology and limitations, and way forward. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 177, pp. 617–634. DOI: 10.1016/j.psep.2023.07.012.
8. *Казаков Б. П., Колесов Е. В., Накаряков Е. В., Исаевич А. Г.* Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 5-33. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5.
9. *Попов М. Д., Семин М. А., Левин Л. Ю.* Анализ воздухораспределения в наклонной горной выработке при наличии интенсивного источника тепловыделения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № 4. – С. 140-151. DOI: 10.15372/FTPRI20240412.
10. *Peng, S., Huang Z., Dong D. V.* Numerical simulation study on fire hazard of a coal mine transport roadway // *Mining Science*, 2022, vol. 29, pp. 33-52. DOI: 10.37190/msc222904.
11. *Yao Y., Wang J., Jiang L., Wu B., Qu B.* Numerical study on fire behavior and temperature distribution in a blind roadway with different sealing situations // *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, no. 13, pp. 36967–36978. DOI: 10.1007/s11356-022-24896-4.
12. *Thomas P. H., Hinkley P. L., Theobald C. R., Simms D. L.* Investigations into the Flow of Hot Gases in Roof Venting // Her Majesty's Stationary Office: London, UK, 1963, vol.7, no. 3, pp. 100-112.
13. *Hansen R.* Overview of fire and smoke spread in underground mines // *Proceedings from the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, Frankfurt am Main, Germany, 2010. pp. 483–494.
14. *Cafaro E., Bertola V.* Fires in tunnels: Experiments and modelling // *The Open Thermodynamics Journal*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 156-166. DOI: 10.2174/1874396X01004010156.
15. *Carey A. C.* Scale Modeling of Static Fires in a Complex Geometry for Forensic Fire

- Applications // Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park, MD, USA, 2010, 127 p.
16. *Prahl, J., Emmons H. W.* Fire induced flow through an opening // *Combust. Flame*, 1975, vol. 25, no. 3, pp. 369–385.
 17. *Свердлов А. В., Волков А. П., Рыков С. В., Волков М. А., Барафанова Е. Ю.* Моделирование процессов дымоудаления в подземных сооружениях транспортного назначения // *Вестник Международной академии холода*. – 2019. – № 1. – С. 3-10. DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-1-3-10.
 18. *Шалимов А. В., Жихарев С. Я., Семин М. А.* Критерии подобия для масштабного моделирования шахтных пожаров в наклонных горных выработках // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2025. – № 4. – С. 108-119. DOI: 10.15372/FTPRPI20250410.
 19. *Левин Л. Ю., Семин М. А., Попов М. Д., Жихарев С. Я.* Валидация модели тепломассопереноса в атмосфере горизонтальной горной выработки при наличии интенсивного источника нагрева // *Недропользование*. – 2024. – Т. 24. – № 3. – С. 169-176. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.3.8.
 20. *Попов М. Д.* Разработка методики расчёта устойчивости проветривания рудников в аварийных ситуациях, связанных с наличием тепловых депрессий // *Горное эхо*. – 2024. – № 2 (95). – С. 80-86. DOI: 10.7242/echo.2024.2.15.
 21. *Hu D., Li Z., Wang H., Xu H., Miao C.* Smoke dispersion test and emergency control plan of fire in mine roadway during downward ventilation, *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 1-11. DOI: 10.1038/s41598-023-30779-6.

Благодарности:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 126012716039-2).

Для цитирования:

Шалимов А.В., Жихарев С.Я., Семин М.А., Кузьминых Е.Г. Низкотемпературное масштабное моделирование устойчивости движения воздуха в наклонной горной выработке с источником выделения тепла // *Вестник Пермского федерального исследовательского центра*. – 2026. – № 1. – С. 19–32. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2026.1.2>

Сведения об авторах:

Шалимов Андрей Владимирович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Горный институт УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: shalimovav@mail.ru, ORCID: 0000-0001-6675-9093
Жихарев Сергей Яковлевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, «ГИ УрО РАН»; e-mail: perevoloki55@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4102-6066

Семин Михаил Александрович, доктор технических наук, заведующий лабораторией математического моделирования геотехнических процессов, ученый секретарь, «ГИ УрО РАН»; e-mail: seminma@inbox.ru, ORCID: 0000-0001-5200-7931

Кузьминых Евгений Геннадьевич, инженер, «ГИ УрО РАН»; e-mail: kuzminykh.evgeniy@gmail.com, ORCID: 0009-0005-9596-8050

LOW-TEMPERATURE LARGE-SCALE MODELING OF AIR FLOW STABILITY IN AN INCLINED MINE WORKING WITH A HEAT SOURCE

Shalimov A.V., Zhikharev S.Ya., Semin M.A., Kuzminykh E.G.

Mining Institute UB RAS, Perm

An analysis was carried out on the possibilities of large-scale modeling of downward airflow in inclined mine workings with a heat source within the parametric range of airflow instability. It was established that accurately reproducing model similarity to reality in this range is only possible within the framework of the Froude scaling rules with identical air temperature, which at the fire source reaches 1500 K or more. Since achieving such air heating under laboratory conditions is problematic, an attempt was made to obtain approximate low-temperature scaling relations based on estimated calculations targeting a threefold reduction in temperature with a tenfold reduction in geometric dimensions. The obtained relations were verified through numerical modeling of the thermal plug effect in the SolidWorks software suite, as well as on a laboratory simulation stand. The relative error in determining the overturning point of airflow due to thermal depression in model and full scale was 2%. Both methods of modeling the thermal plug effect showed the same dynamic scenario of airflow direction change via instability, in which the flow overturns gradually, forming large-scale convective vortices and multi-directional vertical velocity stratification across the cross-section.

Keywords: *mine fires, thermal depression, airflow stability, adiabatic and isothermal boundaries, heat release intensity, thermal plug, simulation stand, scaling rules*

Поступила в редакцию: 18.11.2025

Принята к публикации: 08.04.2026