УДК 622.4

В.В.СМИРНЯКОВ, *канд. техн. наук, доцент, smirnyakovvv@yandex.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

V.V.SMIRNIAKOV, *PhD in eng. sc., associate professor, smirnyakovvv@yandex.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ВЫБОР И ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АЭРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБРУШЕНИИ ОСНОВНОЙ КРОВЛИ

Рассмотрены необходимые условия для выбора критериев подобия при моделировании аэрогазодинамических процессов при обрушении пород основной кровли и проведен анализ критериев.

Ключевые слова: физическое моделирование, аэрогазодинамические процессы, аэродинамика выработанных пространств, обрушение кровли, основная кровля, ударная волна, критерии подобия.

CHOICE AND VALUATION OF SIMILARITY PARAMETERS FOR AERO-GAS-DYNAMIC MODELING WITH MAIN ROOF COLLAPSE

The article describes the necessary conditions for similarity parameters choosing for aero-gas-dynamic modeling with main roof collapse and it has been made analysis of them.

Key words: physical simulation, aero-gas-dynamic processes, aerodynamic of mined-out spaces, roof collapse, main roof, impulse wave, similarity parameters.

Проведение в производственных условиях наблюдений за процессом обрушения и распределения объема газовоздушной смеси, находящейся под основной кровлей, довольно трудоемко, а зачастую невозможно и небезопасно. Аналитически описать данный процесс также весьма сложно, так как он существенно нестационарен и даже в простейших случаях требует применения сложного математического аппарата [4]. Поэтому исследование зависимости скорости воздушных потоков и объема истечения воздуха от параметров обрушения целесообразно провести в лабораторных условиях методом физического моделирования. Рабочей средой при этом могут быть воздух (аэромоделирование) или вода (гидромоделирование). При уменьшении масштаба модели параметры обрушения могут быть заданы и легко изменены по желанию исследователя, возможна их дифференциация друг относительно друга [1-3, 6, 7, 13].

Конечной целью моделирования является установление закономерностей газовыделения (объема и концентрации) из выработанного пространства при обрушении основной кровли. Основная задача состоит в определении скорости и времени существования воздушного потока в выработках модели. При этом необходимо учитывать, что гидромоделирование из-за гораздо большей вязкости воды, по сравнению с воздухом, дает огромную ошибку в определении данных величин. Поэтому единственным приемлемым методом моделирования аэрогазодинамики выработанного пространства при обрушении основной кровли является физическое аэромоделирование.

В результате обзора работ, посвященных вопросам аэромоделирования, уста-

новлено, что при экспериментах исследовалась главным образом качественная сторона изучаемого процесса и производились замеры некоторых аэродинамических параметров [5, 8-10, 14-16].

Изготовление модели и моделирование необходимо проводить с обязательным соблюдением законов подобия. Для моделирования аэрогазодинамических процессов при обрушении основной кровли должны соблюдаться геометрическое, кинематическое, временное и динамическое подобия между натурными объектами и моделью [7].

Геометрическое подобие обеспечивается одинаковым уменьшением всех размеров модели выемочного участка в масштабе $1/m$, который выбран исходя из конструкционных особенностей модели, так, что соблюдается условие

$$m = \frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{м}}} = \text{idem}, \qquad (1)$$

где $L_{\text{н}}$ и $L_{\text{м}}$ – линейные размеры соответствующих геометрических элементов натуры и модели.

При обеспечении кинематического и динамического подобия необходимо учесть, что в нашем случае моделирование проводится для определения зависимости выносимого из выработанного пространства объема воздуха от различных факторов и соотношения скоростей воздушных потоков в некоторых точках модели. Установив эти соотношения и закономерности для модели и приняв их справедливыми для натуры, можно определить те величины, которые нельзя замерить в натурных условиях (например, скорость и количество воздуха в лаве в момент обрушения).

Кинематическое подобие будет выполнено, когда в потоках воздуха в модели и в натуре сходственные частицы проходят подобные траектории пути в пропорциональные отрезки времени. Кинематическое подобие обеспечивается соблюдением геометрического подобия при условии

$$m = \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{м}}} = \text{idem}, \qquad (2)$$

где $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{м}}$ – характерные скорости движения воздуха в сходственных точках потока.

Временное подобие обеспечивается соблюдением критерия гомохронности (числа Струхаля)

$$Sh = \frac{\upsilon_{\text{ср}}\,\tau}{d}, \qquad (3)$$

где $\upsilon_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока; τ – характерный промежуток времени (период протекания процесса); d – характерный линейный размер потока.

Динамическое подобие обеспечивается, когда числа Рейнольдса в модели и натуре одинаковы. В модели выполнить такое условие технически сложно. В наших условиях нестационарного процесса движения воздушной среды число Рейнольдса не может служить в качестве критерия подобия, так как содержит в своем составе неизвестную величину средней скорости:

$$\text{Re} = \frac{\upsilon_{\text{ср}} d}{\nu}, \qquad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость воздуха.

При моделировании движения жидкостей или газов критерием не может быть также число Эйлера, которое характеризует соотношение между силами давления, действующими на элементарный объем жидкости или газа, и инерционными силами, и также содержит в своем составе неизвестную величину средней скорости. Число Эйлера определяют формулой

$$\text{Eu} = \frac{P}{\rho \upsilon_{\text{ср}}^2}, \qquad (5)$$

где P – давление воздуха; ρ – плотность воздуха.

Однако, согласно данным К.З.Ушакова, для выполнения динамического критерия достаточно соблюдения подобия характерных скоростей [8, 10-12]. Он предложил вместо критерия Рейнольдса пользоваться числом Кармана, учитывающим интенсивность турбулентности:

$$\text{E} = \frac{U'}{\upsilon_{\text{ср}}}, \qquad (6)$$

где U' – среднеквадратичная пульсационная скорость потока.

Основной недостаток данного критерия для наших условий состоит в том, что он не содержит в себе давления и характерных размеров потока.

Число Фруда характеризует соотношение между действующими на элементарный объем жидкости или газа силой инерции и внешней силой, в поле которой происходит движение:

$$\mathrm{Fr} = \frac{\omega_к^2}{gh}, \qquad (7)$$

где $\omega_к$ – конечная скорость падения кровли; h – высота обрушения.

Соблюдение этого критерия достигается выполнением геометрического и кинематического подобий, однако критерий не содержит в своем составе давления.

Соблюдение теплового подобия в нашем случае не является необходимым условием, так как разница в значениях температуры воздуха в помещении при моделировании и в горных выработках при натурных наблюдениях минимальна. Что касается теплообмена воздуха со стенками горных выработок и модели, то ими можно пренебречь ввиду малого времени взаимодействия потока (несколько секунд) со стенками выработки или модели.

Как видно из анализа формул приведенных критериев подобия, ни один из них в отдельности не может обеспечить соблюдение динамического подобия. В этом случае необходимо выбрать критерий, отвечающий постановке задачи, которая в общем виде может быть решена следующим образом [4].

Задан перепад давления P на участке выработки длиной L и диаметром d. Требуется определить объемный расход газа Q сквозь нее. Перепад давлений представляет собой гармоническую функцию с периодом T, частотой $N = 1/T$ и амплитудой P. В этом случае никакой характерной скорости задать нельзя и поэтому ни одно из чисел Sh, Eu и Re не может быть критерием подобия в отдельности, поскольку скорость потока υ не должна входить в критерий [4]:

$$\frac{\mathrm{EuRe}}{\mathrm{Sh}} = \left(\frac{P}{\rho\upsilon_{ср}^2}\right)\left(\frac{\upsilon_{ср}d}{\nu}\right)\left(\frac{\upsilon_{ср}}{Nd}\right) = \frac{P}{\rho\nu N}. \qquad (8)$$

Числа Рейнольдса, Эйлера и Струхаля не будут в данном случае критериями подобия, а определятся как функция от полученного критерия:

$$\mathrm{Re,Eu,Sh} = f\left(\frac{P}{\rho\nu N}\right). \qquad (9)$$

Выполнение динамического подобия достигается равенством выражений формулы (2) в натуре и в модели, что, в свою очередь, обеспечивается геометрическим и временным подобием.

Таким образом, при проведении экспериментов по моделированию аэрогазодинамических процессов при обрушении кровли должны быть соблюдены геометрическое, кинематическое и временное подобия. Для соблюдения динамического подобия при решении поставленной задачи достаточно обеспечить подобия геометрических размеров в принятом масштабе и характерных скоростей в модели и натуре, а также выполнить критерий (2). Необходимо также соблюдение начальных и граничных условий изучаемых явлений [7].

Режим движения воздушного потока после обрушения основной кровли сначала является инерционным, когда преобладают силы давления и инерции, а силами трения можно пренебречь. С уменьшением влияния инерционных сил возрастают силы трения и воздушный поток характеризуется вязкостным режимом течения. Начальными условиями в этом случае являются:

- условия взаимодействия обрушенных пород с окружающей средой;
- условия входа воздушного потока в прилегающие к выработанному пространству выработки.

Данные условия выполняются при соблюдении геометрического подобия.

Граничными условиями в нашем случае следует считать взаимодействие воздушного потока со стенками модели выработки. В данном случае подобие может быть осуществлено независимо от размеров модели при условии соблюдения геометрического подо-

бия [7]. Множители подобия, определяющие масштаб моделирования, для обоих режимов будут одинаковы, при этом необходимо учесть, что основной измеряемый параметр в нашем случае – скорость воздушного потока, зависящая, в свою очередь, от перепада давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барышев А.С.* Исследование процессов проветривания камер большого сечения после взрывных работ при разработке месторождений каменных солей: Автореф. дис.... канд. техн. наук. Л., 1976. 23 с.

2. *Дьяков В.В.* О методах имитации и измерения вредных примесей при аэродинамическом моделировании / В.В.Дьяков, В.В.Лупин, В.Е.Родин // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов. Апатиты, 1977. С.66-72.

3. *Казаков А.П.* Методика моделирования аэродинамических особенностей движения воздуха при проветривании камер большого объема // Вентиляция шахт и рудников. Л., 1978. С.72-79.

4. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М., 1987. 840 с.

5. *Маевская В.М.* Принципы моделирования движения метановоздушной смеси в выработанном пространстве / В.М.Маевская, А.Г.Поликарпов // Способы и средства предупреждения самовозгорания угля в шахтах. Кемерово, 1988. С.80-83.

6. *Мясников А.А.* Управление газовыделением при разработке угольных пластов / А.А.Мясников, А.С.Рябченко, В.А.Садчиков. М., 1987. 216 с.

7. *Насонов И.Д.* Моделирование горных процессов. М., 1969. 204 с.

8. *Пучков Л.А.* Аэрогазодинамика выработанных пространств. М., 1993. 205 с.

9. *Пучков Л.А.* Моделирование аэродинамических процессов в выработанном пространстве угольных шахт // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов. Апатиты, 1977. С.51-56.

10. *Пучков Л.А.* Режим движения воздуха в выработанном пространстве // Изв. вузов. Горный журнал. 1965. № 10. С.64-67.

11. *Ушаков К.З.* Аэродинамическое моделирование шахтных вентиляционных потоков // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов. Апатиты, 1977. С. 48-52.

12. *Ушаков К.З.* Аэромеханика вентиляционных потоков в горных выработках. М., 1975. 195 с.

13. *Ушаков К.З.* О моделировании аэродинамических процессов в горных выработках // Изв. вузов. Горный журнал. 1969. № 12. С.30-33.

14. *Ушаков К.З.* Определение аэродинамических сопротивлений выработанного пространства при использовании нетрадиционной технологии отработки угля / К.З.Ушаков, В.Д.Косарев // Нетрадиционные технологии разработки угольных месторождений. М., 1988. С.70-73.

15. *Шевелев Г.А.* О режиме движения воздуха через выработанное пространство // Уголь Украины. 1976. № 6. С.72-76.

16. *Шепелев С.Ф.* Моделирование аэрогазодинамических процессов, сопровождающих массовые взрывы в подземных условиях / С.Ф.Шепелев, Г.И.Селиванов, В.М.Мун // Физическое моделирование тепловентиляционных и пылевых процессов. Апатиты, 1977. С.57-59.

REFERENCES

1. *Baryshev A.S.* Phenomenology of aeration for breasts with big profile after blasting operations for rock-salt mining: Research Paper ...PhD in eng. sc. Leningrad, 1976. 23 p.

2. *Dyakov V.V., Lupin V.V., Rodin V.E.* About methods of contaminants imitation and measuring in aerodynamic modeling // Physical simulation for fan heater and dust processes. Apatity. 1977. P.66-72.

3. *Kazakov A.P.* Methods of aerodynamic features modeling for air flood in breasts with big volume // Mining ventilation. Leningrad, 1978. P.72-79.

4. *Loyayzyansky L.G.* Fluid mechanics. Moscow, 1987. 840 p.

5. *Maevskaya V.M., Policarpov A.G.* The principles of methane-air mixture ventilation modeling in worked-out space // Methods and warning means of coal self-ignition in mines. Kemerovo. 1988. P.80-83.

6. *Myasnikov A.A., Ryabchenko A.S., Sadchikov V.A.* Gas control for coal bed mining. Moscow, 1987. 216 p.

7. *Nasonov I.D.* Mining processes modeling. Moscow, 1969. 204 p.

8. *Puchkov L.A.* Air-gas-dynamic of worked-out spaces. Moscow, 1993. 205 p.

9. *Puchkov L.A.* Aerodynamic modeling in worked-out space of coal mines // Physical simulation for fan heater and dust processes. Apatity, 1977. P.51-56.

10. *Puchkov L.A.* Ventilation conditions in worked-out space // News of the Higher Institutions. Mining jornal. 1965. № 10. P.64-67.

11. *Ushakov K.Z.* Aerodynamic modeling for mining ventilation airflow // Physical simulation for fan heater and dust processes. Apatity, 1977. P.48-52.

12. *Ushakov K.Z.* Aeromechanics of ventilation airflows in mines. Moscow, 1975. 195 p.

13. *Ushakov K.Z.* About aerodynamic modeling in mines // News of the Higher Institutions. Mining jornal. 1969. № 12. P.30-33.

14. *Ushakov K.Z., Kosarev V.D.* Aerodynamic resisting definition of worked-out space with use of unconventional technology of coal mining // Unconventional technology of coal mining. Moscow, 1988. P.70-73.

15. *Shevelev G.A.* About conditions of ventilation through worked-out space // The Ukraine coal. 1976. № 6. P.72-76.

16. *Shepelev S.F., Selivanov G.I., Mun V.M.* Aerodynamic modeling for single blast in underground conditions // Physical simulation for fan heater and dust processes. Apatity, 1977. P.57-59.