

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.69

DOI:10.7242/echo.2024.1.13

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ ПОЖАРНОГО ТРУБОПРОВОДА ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА

С.А. Бублик, М.А. Семин, О.С. Паршаков, Д.В. Ольховский, А.В. Зайцев  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В настоящей статье рассмотрены особенности математического моделирования переходных гидродинамических процессов в гидравлической сети пожарного трубопровода и системы водоотлива подземного рудника. Предложена модификация системы уравнений гидравлического удара, заключающаяся в учете дополнительных граничных условий, моделирующих различные объекты гидравлической сети, учете постепенного опустошения трубопровода в результате потребления воды работающей горной техникой.

**Ключевые слова:** рудник, пожарный трубопровод, математическое моделирование, гидравлический удар, водораспределение.

Эффективная эксплуатация системы водоснабжения подземных рудников имеет решающее значение для обеспечения производственной мощности добычи полезных ископаемых и безопасности труда горнорабочих. Неотъемлемым элементом эффективной эксплуатации таких систем является математическое моделирование, являющееся полезным инструментом, ускоряющим и упрощающим анализ и проектирование разветвленных сетей шахтных трубопроводов [1]. Однако динамический характер потока воды в системах трубопроводов подземных рудников создает дополнительные трудности при анализе и управлении переходными процессами при изменении параметров работы отдельных узлов системы (клапаны, резервуары, редукторы, потребители воды и пр.). Быстрое изменение параметров таких узлов может сопровождаться таким явлением, как гидравлический удар. Он характеризуется быстрыми колебаниями давления, возникающими в результате внезапных изменений скорости или направления потока, может привести к повреждению оборудования, сбою системы и угрозам безопасности, если его правильно не понять и не принять эффективные меры [2].

Последнее невозможно без проведения предварительного теоретического анализа с использованием таких моделей, которые с достаточной степенью детализации способны воспроизвести картину распределения основных гидродинамических характеристик потока как при стационарных, так и при переходных режимах работы систем трубопроводов подземных рудников. Одной из таких моделей являются классические уравнения гидравлического удара [2, 3], которые обеспечивают основу для прогнозирования переходных процессов давления и динамики потока в сети трубопроводов. Оно включает в себя уравнения неразрывности

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

и движения

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\lambda v |v|}{2d} = 0, \quad (2)$$

где  $p$  – статическое давление, Па;  $t$  – время, с;  $v$  – средняя продольная скорость воды в трубопроводе, м/с;  $x$  – пространственная координата вдоль оси трубопровода, м;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – скорость звука в воде, м/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $z$  – перепад высот, м;  $\lambda$  – гидравлический коэффициент трения;  $d$  – диаметр трубопровода, м.

Гидравлический коэффициент трения рассчитывается по следующей методике [4]. В относительно гладких трубах при низких числах Рейнольдса ( $Re < \frac{10d}{\Delta}$ ) величина  $\lambda$  определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (3)$$

В переходной области, соответствующей числам Рейнольдса  $\frac{10d}{\Delta} \leq Re < \frac{560d}{\Delta}$ , расчет  $\lambda$  производится по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (4)$$

В области высоких чисел Рейнольдса ( $Re \geq \frac{560d}{\Delta}$ ), для которой справедлив квадратичный закон гидравлического сопротивления, гидравлический коэффициент трения вычисляется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Здесь  $\Delta$  – эквивалентная шероховатость, которая чаще всего представляет собой среднюю высоту неровностей на внутренней поверхности трубы, м. Число Рейнольдса  $Re$ , используемое для определения закона течения и величины коэффициента трения, определяется по формуле:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (6)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воды, Па·с.

При расчете  $\lambda$  рассматривались только сопротивления трения прямых участков трубопроводов, в то время как местные сопротивления не учитывались.

Уравнения (1)-(6) используются для определения характеристик потока в отдельных трубах, в то время как для корректной состыковки гидродинамических параметров в узловых соединениях между трубами используются дополнительные граничные условия. Всего нами выделяется шесть видов граничных условий: соединения труб, насос, резервуар, потребитель, вентиль, редукционный клапан. Для каждого из них записываются соответствующие уравнения. Например, при моделировании соединения труб предполагается равенство входящего и исходящего расхода воды, а также равенство давлений в узле, где соединяются трубы. При моделировании насоса предполагается, что входящий в насос расход равен исходящему, а давление  $p$  испытывает скачок, определяемый напорной характеристикой  $\Delta p = f(v)$ .

Объект резервуар является более сложным, так как здесь предполагается, что статическое давление водяного потока на выходящей из резервуара ветви трубопровода зависит от уровня воды  $h$  (м) в резервуаре (см. рис. 1а) по некоторому линейному закону

$$p = \rho g h(t). \quad (7)$$

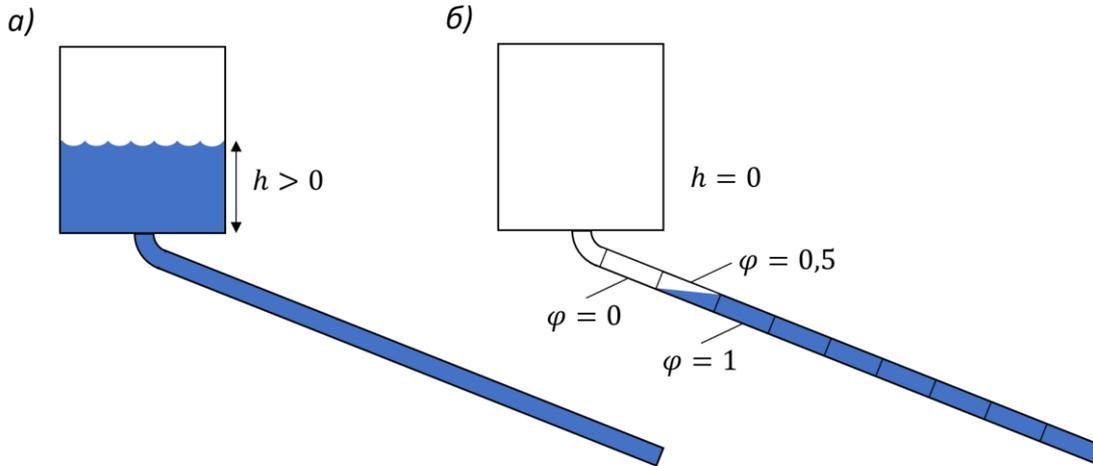


Рис. 1. Ненулевой уровень воды в резервуаре (а) и постепенное опустошение трубопровода при отсутствии воды в резервуаре (б)

Зависящая от времени величина  $h(t)$  определяется разницей притока  $Q_+$  и оттока  $Q_-$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) воды из резервуара:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{S} (Q_+ - Q_-). \quad (8)$$

В случае отсутствия фактических данных о наполненности резервуара более правильным будет представить резервуар в виде трубопровода, через который вода подается в рудник: в этом случае граничное условие упрощается до задания постоянного во времени давления на верхнем конце трубопровода.

В случае, когда резервуар опустошен (т.е.  $h = 0$ , а его пространство заполнено воздухом), в исходящие из резервуара трубопроводы вместо воды начинает поступать воздушный поток. Классические уравнения (1)-(2) неприменимы для описания течения в таких трубопроводах, частично заполненных водой. А потому для решения этой проблемы модель гидравлического удара была модифицирована и дополнена уравнением переноса объемного содержания воды

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + v \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

Здесь  $\varphi$  – объемное содержание воды,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Оно принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Причем единица соответствует ситуации, когда рассматриваемый малый сегмент трубопровода полностью занят водой, а ноль – ситуации, когда он полностью занят воздухом (см. рис. 1б). Также в рамках данной модели учитываются ситуации, когда трубопровод частично занят водой.

Распределение  $\varphi(x)$  оказывает непосредственное влияние на гидродинамические характеристики воды, ранее определявшиеся из решения уравнений (1)-(2). В случае, если в рассматриваемом малом объеме  $dV = \frac{\pi d^2}{4} dx$  трубопровода  $\varphi < \varphi_{cr}$ , трубопровод считается незаполненным, давление принимается равным атмосферному, а уравнения (1)-(2) для этого малого сегмента не решаются. В противном случае при соблюдении условия  $\varphi \geq \varphi_{cr}$  характеристики потока в сегменте  $dV$  находятся с использованием уравнений (1)-(2). Величина  $\varphi_{cr}$  представляет собой некоторое критическое объемное содержание воды.

Наряду с расчетом основных гидродинамических характеристик потока в уравнениях гидравлического удара важно учитывать распределение поля температур в системе трубопроводов подземных рудников. При использовании систем охлаждения и орошения воздуха важно заранее знать температуру воды, которая будет подана к конечным потребителям (теплообменным аппаратам, испарителям и пр.). Для этой цели математическая модель (1)-(9) также дополняется уравнением переноса теплоты в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k}{\rho c} (T_* - T). \tag{10}$$

Здесь  $T$  – температура воды в трубопроводе, °С;  $c$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С);  $k$  – коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $T_*$  – температура воздуха в горной выработке, через которую проложен трубопровод, °С.

Уравнения (9) и (10) дополняются граничными условиями в узловых участках. Для большинства типов узловых соединений принимаются условия постоянства потока величин  $\varphi$  и  $T$ . Для соединения трех и более трубопроводов условие немного сложнее. В нем расчет значений температуры  $T$  на соединении происходит путем вычисления взвешенного среднего по всем входящим в соединение потокам воды. В качестве веса принимается объемный расход воды  $Q$ . Аналогичный подход использовался в [5]. Рассчитанные для каждого соединения значения температуры  $T$  задаются в качестве входных граничных условий для трубопроводов, в которые вода втекает из рассматриваемого соединения труб. По объемному содержанию воды  $\varphi$  расчет происходит немного иначе.

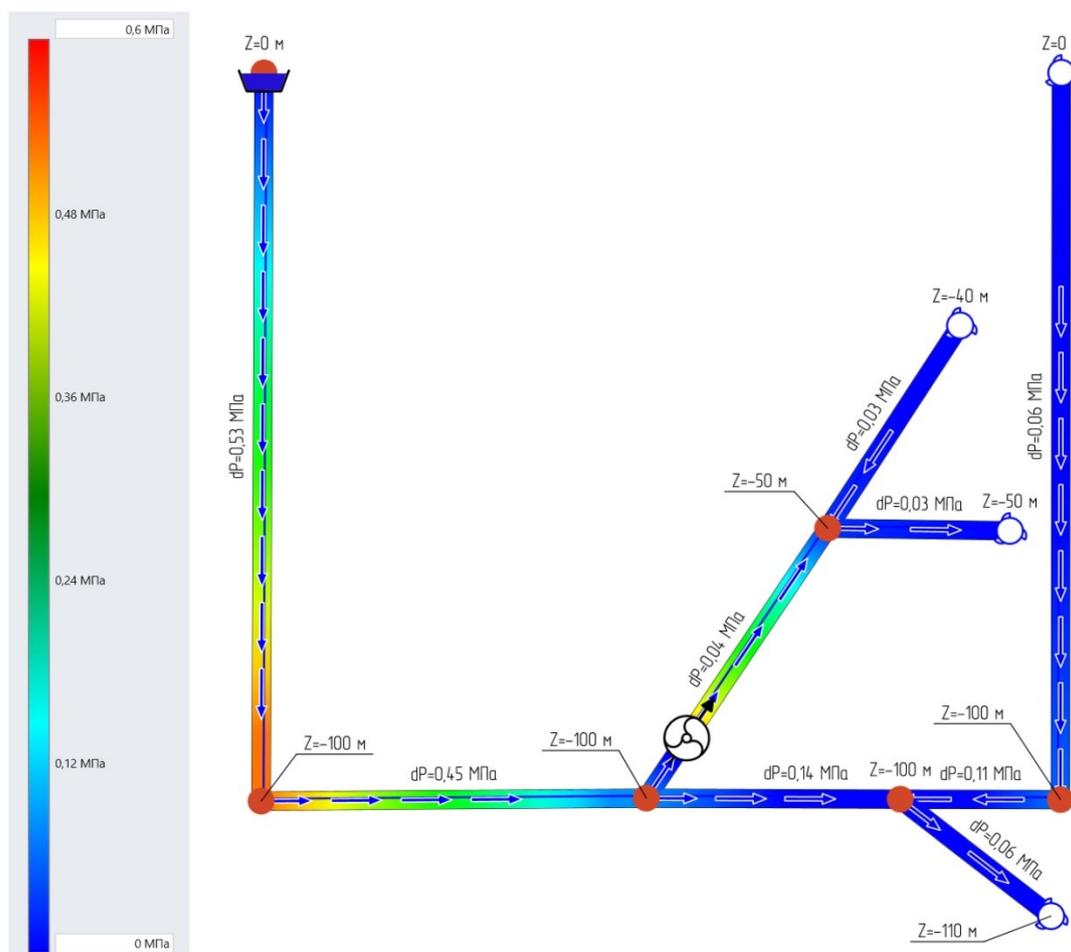


Рис. 2. Распределение давлений воды в системе трубопроводов

Численная реализация системы уравнений (1)-(2) осуществлялась с использованием метода характеристик [6]. Численная реализация системы уравнений (9) и (10) осуществлялась с помощью метода конечных разностей. Программный код написан в среде Visual Studio на языке С# и реализован в качестве отдельного расчетного модуля в аналитическом комплексе «Аэросеть». На рис. 2 представлено рассчитанное в Аэросети распределение давления воды в системе трубопроводов для модельного рудника с двумя стволами и одним подземным горизонтом.

Помимо цветовой шкалы, отражающей величину давления, индикаторами показаны перепады давления воды в трубопроводе, направления течения потока, потребители воды и их высотные отметки. Из рис. 2 видно, что давление воды при прохождении ее через насос возрастает, в результате этого увеличивается и в дальнейшем поддерживается постоянный расход воды на участке трубопровода, идущего до отметки  $-50$  м. При этом трубопровод, концевой участок которого расположен на отметке  $-40$  м, с течением времени опустошается, как и трубопровод правого ствола модельного рудника, потому прирост давления на нижних сопряжениях этих трубопроводов постоянно уменьшается до момента их полного опустошения. Распределение объемного содержания воды представлено на рис. 3.

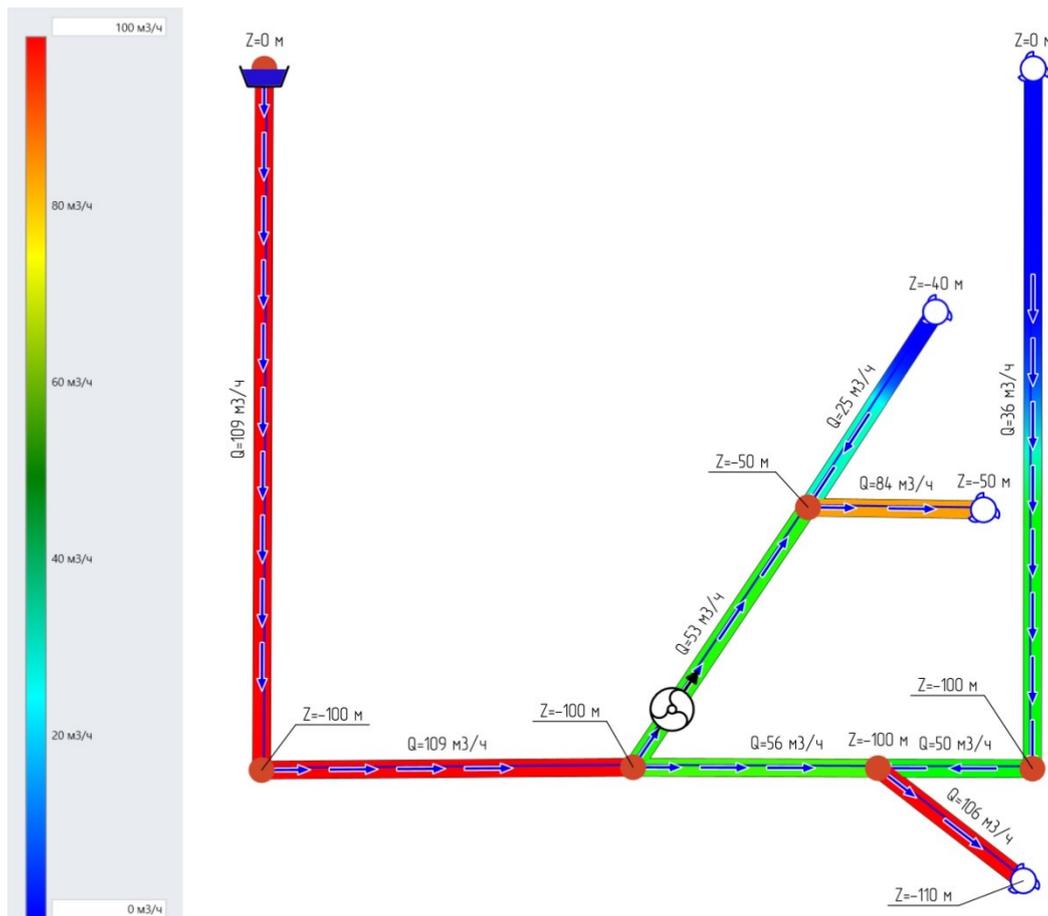


Рис. 3. Распределение объемного содержания воды в системе трубопроводов

Представленный расчет соответствует отдельно взятому моменту времени. В целом картина является нестационарной, так как происходит постепенное опустошение трубопроводов. Следует отметить, что помимо опустошения/наполнения трубопроводов дополнительно на нестационарность гидравлического расчета влияет переменный характер потребления воды и работы насосов.

Таким образом, на основе разработанной модели появляется возможность анализа процессов нестационарного массопереноса, происходящих в шахтных системах водоснабжения и водоотлива рудников, с учетом произвольной топологии и состояния сети трубопроводов, влияния запорно-регулирующих устройств, а также изменения параметров водопотребления. При этом многопараметрическое моделирование гидравлических процессов позволит повысить качество разработки технических решений при проектировании шахтных систем трубопроводов, являющихся неотъемлемой частью технологии и безопасности ведения горных работ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ  
в рамках государственного задания  
(проекты № 122030100425-6 и № 124020500030-7).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калинин Н.Б., Калинина М.Н. К вопросу о формировании рациональных требований к программно-аварийно-вентиляционному комплексу (для мониторинга, текущего и перспективного моделирования состояния технологических сетей шахт) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – №. 6. – С. 70-73.
2. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 247 с.: ил.
3. Sam Ani H.M.V., Khayatzaheh A. Transient flow in pipe networks // Journal of Hydraulic Research. – 2002. – V. 40, №. 5. – С. 637-644. – DOI: 10.1080/00221680209499908.
4. Раинкина Л.Н. Определение коэффициента гидравлического трения: метод. указания к выполнению лаб. работы / УГТУ. – Ухта, 2000. – 25 с.
5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 154-161.
6. Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 101-109.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2024.1.14

### ГАЗОНОСНОСТЬ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛЯНОГО ПОРОДНОГО МАССИВА I КАЛИЙНОГО ГОРИЗОНТА ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В УСЛОВИЯХ РУДНИКА I РУ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»

Н.А. Литвиновская  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В статье представлены подробные результаты исследования газоносности и газодинамических характеристик свободного газа соляных пород I калийного горизонта при подработке и надработке горными выработками в различных горнотехнических ситуациях.

**Ключевые слова:** газоносность, свободные газы, газодинамические характеристики, подработка, надработка, сильвинит, каменная соль, I калийный горизонт.

#### Введение

Истощение рудной базы I РУ ПАО «Беларускалий» привело к необходимости отработки верхнего сильвинитового пласта I калийного горизонта (рис. 1).