

## О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА ГИДРОСТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ПОРОД В ГОРНОМ ДЕЛЕ



К. А. ГОЛОВИН,  
доцент, канд. техн. наук



Р. А. КОВАЛЕВ,  
проф., д-р техн. наук



А. Е. ПУШКАРЕВ,  
проф., д-р техн. наук

Тульский государственный университет

При проведении и поддержании горных выработок, строительстве подземных сооружений, котлованов и т. д. в неустойчивых породах используют известные способы повышения их прочности, устойчивости и гидроизоляции: замораживание, закрепление связывающими растворами, химическое и электрохимическое закрепление, водопонижение, а также специальные способы проведения горных выработок, например, кессонный.

В последнее время на рынке машиностроительной техники, главным образом за рубежом (Япония, Италия, Англия), появилось оборудование для закрепления грунтов способом гидроструйной цементации (ГСЦ) при строительстве оснований и фундаментов, возведении свай и т. д. Сущность ГСЦ пород (Jet grouting) заключается в использовании кинетической энергии высокоскоростной суспензионной водоцементной струи, погруженной в породный массив и вращающейся в плоскости, перпендикулярной оси предварительно пробуриваемой до проектной отметки скважины, с одновременным перемещением вдоль этой оси обратным ходом, без создания в массиве избыточного давления. В результате разрушения и перемешивания породы суспензионной струей формируется закрепленный массив цилиндрической формы заданной длины, состоящий из нового материала — породобетона.

ГСЦ позволяет улучшить прочностные и деформационные свойства любых сжимаемых дисперсных пород как природного, так и техногенного происхождения. Инженерная идея оказалась настолько плодотворной, что в последнее десятилетие способ ГСЦ пород и основанные на нем технологии широко распространились по всему миру, практически минуя при этом горную промышленность.

К преимуществам технологии ГСЦ в сравнении с известными методами упрочнения неустойчивых пород относят следующие [1–3]:

долговременный характер закрепления массива после снятия закрепляющего воздействия в сравнении с самым распространенным способом — замораживанием;

высокая скорость выполнения работ по укреплению массива;

принципиальная возможность размещения оборудования в стесненных подземных условиях;

возможность закрепления любого исходного массива неустойчивой породы как по показателям прочности, так и обводненности;

отсутствие значительных динамических нагрузок на закрепляемый массив, что особенно важно при работе на небольших глубинах под зданиями и сооружениями или вблизи других горных выработок;

высокая предсказуемость результатов укрепления горных пород.

Следует отметить, что существующие технологические и конструктивные решения по ГСЦ грунтов специфичны для строительной отрасли и не могут в своем виде быть использованы в горном деле. Производство же специальных буровых установок для реализации технологии ГСЦ в горной промышленности России в настоящее время отсутствует. В связи с этим следует считать актуальными исследования, направленные на создание научно-технических основ применения метода ГСЦ пород в горной промышленности.

Процесс ГСЦ горных пород сводится к следующему (см. рисунок). На первом этапе с помощью специально оборудованной буровой установки проходят пилотную скважину заданного диаметра до расчетной глубины, определяемой проектом, с промывкой цементным или глинистым раствором под давлением, не превышающим 5 МПа. Промывочную жидкость подают непосредственно в буровой инструмент. На следующем этапе с использованием насосной установки вы-

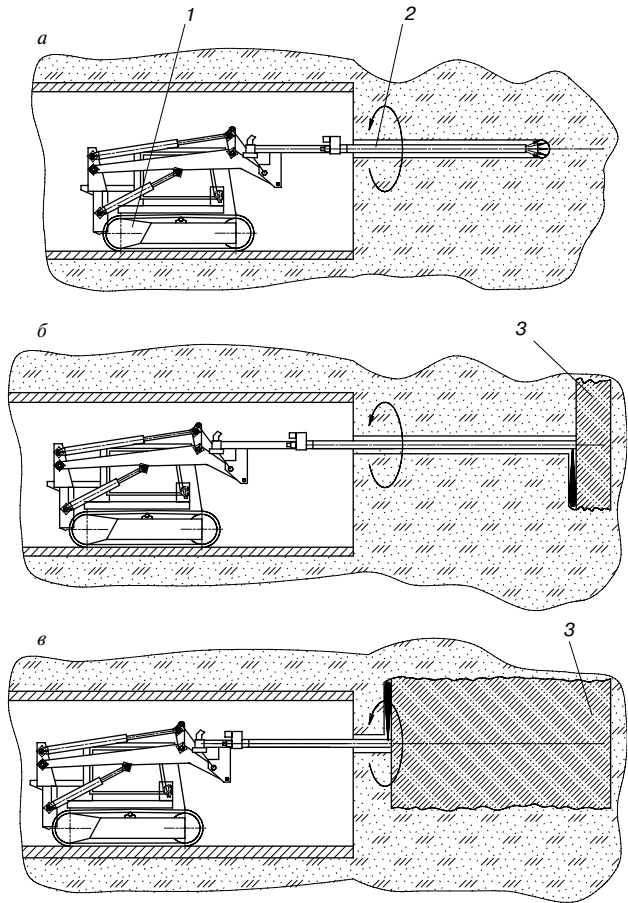
сокого давления к струеформирующей насадке диаметром 0,8–3 мм подают водоцементный раствор под давлением 40–60 МПа. Насадка ориентирована таким образом, чтобы истекающая струя была направлена перпендикулярно оси буровой колонны. В результате вращения буровой колонны и ее перемещения до заданной отметки происходит разрушение и перемешивание породы за счет высокой кинетической энергии водоцементной струи и формируется массив закрепленной горной породы цилиндрической формы заданной длины.

Для экспериментальных исследований процесса ГСЦ горных пород была разработана специальная установка с источником водоцементной суспензии высокого давления (до 60 МПа), включающим цементорочный насос, миксерную станцию и силос для хранения цемента. На основании анализа литературных источников и опыта эксплуатации существующего оборудования для ГСЦ пород, плотность водоцементной суспензии  $\rho$  при экспериментальных исследованиях принимали равной 2000 кг/м<sup>3</sup>. Образцы горных пород (глина, суглинок, супесь, гравий и песок) с различными физико-механическими свойствами в специальных цилиндрических контейнерах крепили на вращающемся от электродвигателя столе установки. Над поверхностью образца породы вдоль оси его вращения располагали струеформирующую насадку с возможностью ее контролируемого перемещения в радиальном направлении. Для регистрации давления водоцементной суспензии стенд оборудован измерительной системой, состоящей из стрелочного манометра прямого действия, тензоманометра и измерительной станции на базе ПК. В исследованиях применяли струеформирующие насадки оригинальной конструкции с коэффициентом расхода  $\mu = 0,75$ .

Влияние физико-механических свойств пород на процесс их ГСЦ исследовали по показателям, которые широко применяют в технологиях размыва горных пород гидромониторными струями (табл. 1).

Для обобщения экспериментальных данных принят за основу экспериментально-статистический метод, предусматривающий графоаналитическую оценку опытных данных с применением методов теории вероятности и математической статистики.

Ранее было установлено, что диаметр закрепляемого массива  $D$  зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются: скорость перемещения буровой колонны  $V$ ; давление водоцементной суспен-



**Технологические этапы закрепления массива пород способом ГСЦ:**

*a* — бурение пилотной скважины; *b* — разрушение и перемешивание горной породы водоцементной суспензионной струей; *v* — извлечение буровой колонны из закрепленного массива; 1 — базовая буровая установка; 2 — буровой став; 3 — закрепленный породный массив

зии  $P$ ; частота вращения буровой колонны  $n$ ; диаметр отверстия струеформирующей насадки  $d_0$ ; коэффициент сцепления породы  $C$ . На процесс ГСЦ оказывают влияние также коэффициент расхода суспензии  $\mu$  через насадку, плотность водоцементной суспензии  $\rho$  и диаметр пилотной скважины  $D_0$ . Таким образом, зависимость между диаметром закрепляемого массива и параметрами ГСЦ пород можно представить в виде

$$D = f_1(D_0, \rho, \mu, d_0, P, V, n, C). \tag{1}$$

Поскольку в процессе экспериментальных исследований параметры  $\rho$ ,  $D_0$  и  $\mu$  не изменяли, то с учетом их постоянства выражение (1) будет иметь вид

$$D = f_2(d_0, P, V, n, C). \tag{2}$$

Исследование параметров функции (2) (табл. 2) и обработка экспериментальных данных методом множественной регрессии позволили получить обобщен-

**Таблица 1. Физико-механические свойства пород, влияющие на процессы ГСЦ**

Показатель	Исследуемые диапазоны значений (варьирование)
Коэффициент сцепления $C$ , МПа	0,006–0,064
Коэффициент крепости $f$ по шкале проф. М. М. Протождяконова	0,3–1,0
Пористость $\delta$ , %	37–53
Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	1690–1820
Расчетное сопротивление $R_0$ , кПа	250–500

**Таблица 2. Исследованные факторы влияния на эффективность технологии ГСЦ горных пород**

Основные факторы	Диапазон изменения значений
Давление водоцементной суспензии $P$ , МПа	40–60
Диаметр струеформирующей насадки $d_0$ , м	0,002–0,003
Скорость подъема буровой колонны $V$ , м/с	0,0017–0,0083
Частота вращения буровой колонны $n$ , с <sup>-1</sup>	0,167–0,500
Коэффициент сцепления горных пород $C$ , МПа	0,006–0,064

**Таблица 3. Типоразмерный и параметрический ряды оборудования для ГСЦ горных пород**

Насосный блок		Буровой став					
Типоразмер	Мощность привода $N$ , кВт	Диаметр проходного сечения бурового става $d_{ст}$ , мм	Варианты исполнения				
			1	2	3	4	5
			Давление номинальное $P_{ном}$ , МПа				
			40	45	50	55	60
		Диаметр отверстия струеформирующей насадки $d_0$ , мм					
1	50	48	2,5	2,5	2,5	2,5	2
2	100	65	4,5	4	3,5	3,5	3
3	160	79	5,5	5	4,5	4,5	4
4	240	93	7	6,5	6	5,5	5
5	420	118	9	8,5	8,5	7	6,5

ную формулу для расчета диаметра закрепляемого ГСЦ массива пород, м:

$$D = 1,09 \cdot (P^{1,03} \cdot d_0^{1,25}) / (V^{0,37} \cdot C^{0,25} \cdot n^{0,07}). \quad (3)$$

Индекс корреляции для данного выражения составил  $R = 0,89$ , а коэффициент вариации опытных данных относительно расчетных —  $K_{вар} = 15,7\%$ , что подтверждает адекватность полученного выражения и указывает на удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных.

В результате экспериментальных исследований установлены закономерности взаимодействия высокоскоростных водоцементных струй с массивом горных пород, что имеет важное значение для разработки соответствующих комплексов оборудования, реализующих технологию ГСЦ в горном производстве. Создание оборудования для ГСЦ включает следующие этапы: выбор источника водоцементной суспензии высокого давления из ряда существующего оборудования, наиболее полно отвечающего технологическим потребностям разрабатываемого комплекса; выбор базового бурового оборудования, отвечающего требованиям работы в стесненных подземных условиях или на открытых горных работах; разработка оригинального оборудования, оснащение которым буровой установки позволит обеспечить рациональные пара-

метры процесса формирования закрепляемого породного массива.

К дополнительному оборудованию относится буровой став, включающий гидросъемник, буровые штанги и монитор. Гидросъемник обеспечивает подачу высоконапорной водоцементной суспензии от насосного блока во вращающуюся буровую колонну. Буровые штанги (линейные секции става) служат для подачи высоконапорной водоцементной суспензии к монитору, передачи осевого усилия и крутящего момента от вращателя бурового станка к буровому инструменту. Монитор предназначен для струйного разрушения горных пород и перемешивания продуктов разрушения.

Результаты экспериментальных исследований позволили разработать и рекомендовать типоразмерный ряд насосных установок и соответствующий ему параметрический ряд буровых ставов (табл. 3), т. е. оптимальную номенклатуру машин исходя из конкретных горнотехнических условий, решаемых задач и технологий закрепления неустойчивых горных пород методом ГСЦ. На основании анализа существующих конструкций буровых машин и с учетом опыта эксплуатации высоконапорного оборудования для гидроструйных технологий разработана также оригинальная конструкция бурового става.

*Список литературы*

1. Бреннер В. А., Головин К. А., Пушкарев А. Е. Разработка оборудования для закрепления массивов неустойчивых горных пород методом гидроструйной цементации: Монография. — Тула: Изд-во ТулГУ, 2007.
2. Головин К. А. Разработка буровых ставов для реализации технологии гидроструйной цементации горных пород // Известия ТулГУ. Сер. «Экология и безопасность жизнедеятельности». Вып. 8. — Тула: ИПП «Гриф и К<sup>о</sup>», 2006.
3. Головин К. А. Факторы и показатели процесса гидроструйной цементации неустойчивых горных пород // Известия ТулГУ. Сер. «Экология и безопасность жизнедеятельности». Вып. 8. — Тула: ИПП «Гриф и К<sup>о</sup>», 2006. **ГЖ**

ON USAGE OF THE METHOD OF HYDRO-JET ROCK CEMENTATION IN MINING MATTER

**Golovin K. A., Kovalev R. A., Pushkarev A. E.**

Investigations and experimental works that have made the basis for substantiation of usage of the method of hydro-jet cementation are presented; this method is used for fixing non-stable rock massifs in mining production. The main parameters of this technology have been determined, dimension range of equipment complexes for realization of hydro-jet cementation technology is developed and proposed.

**Key words:** hydro-jet cementation, rocks, rock concrete, massif fixing, aqua-cement solution, drilling machine, drilling column, nozzle, dimension range of equipment.