

УДК 622.232.52

Разработка оборудования для укрепления дорожного полотна методом гидроструйной цементации

Афонский И.В., Головин К.А., Ковалев Р.А., Кашковский Н.В.

В настоящей статье дан обзор метода струйной цементации, позволяющий получить грунтобетон, имеющий высокие прочностные и деформационные характеристики. В настоящее время работы по гидроструйной цементации дорожного полотна могут проводиться при расположении струеформирующего устройства, как непосредственно на поверхности грунта, так и некотором расстоянии от поверхности. На лабораторном стенде были выполнены исследования, направленные на установление основных закономерностей получения закрепленных породобетонных конструкций без погружения струеформирующего инструмента в горную породу. В качестве основных критериев оценки эффективности процесса ГСЦ горных пород были приняты следующие показатели: глубина закрепления, скорость приращения объема закрепляемого массива и удельная энергоёмкость процесса ГСЦ грунтов. В результате исследований были получены зависимости, позволяющие задавать конструктивные параметры оборудования для закрепления дорожного полотна методом гидроструйной цементации и технологические режимы эксплуатации выбранного оборудования, позволяющие обеспечить требуемые показатели процесса. На основе выполненного анализа и представительного объема исследований представлено перспективное оборудование для закрепления дорожного полотна методом гидроструйной цементации.

Ключевые слова: гидроструйная цементация, грунт, породобетон, дорожное полотно, гидроструйная машина.

Engineering the equipment for reinforcing the roadway by water-jet grouting

Afonskiy I.V., Golovin K.A., Kovalev R.A., Kashkovskiy N.V.

The paper gives an overview of a jet grouting method, providing manufacture of soil-concrete, featuring high strength and deformation performance. Nowadays, jet grouting of roadways can be performed both by placing a jet unit either directly on the ground surface or at a distance from the surface. The research performed on the laboratory bench aims at establishing the basic laws of obtaining fixed rock-concrete structures without imbedding a jet unit into the rock. The main criteria for evaluating the effectiveness of the GSO rock process are the following parameters: the depth of fixing, the rate of volume increment of the fixed rock and energy intensity of GSO soil process. Restrictions for setting the equipment design parameters to secure the roadway by water-jet grouting and technological modes of the selected equipment operation to provide the required process parameters are presented. The perspective equipment for reinforcing roadbeds by water-jet grouting is presented in terms of the performed analysis and extensive studies.

Keywords: water-jet grouting, soil, rock concrete, roadbed, water-jet unit.

Введение

Метод струйной цементации основывается на применении кинетической энергии высоконапорной струи цементного раствора, чье действие разрушает и параллельно смешивает горную породу с цементным раствором. После застывания раствора получается новый мате-

риал, получивший наименование грунтобетона. Грунтобетон имеет довольно высокие прочностные и деформационные характеристики.

Струйная цементация может использоваться в различных типах горных пород, включая практически все виды грунта – от гравий-

ных отложений до мелкодисперсных глин и глинистых илов. Данные характеристики в лучшую сторону отличают технологию струйной цементации от всех традиционных способов инъекционного укрепления грунтов.

Список практического применения метода струйной цементации на сегодняшний день смотрится более чем внушительно. Ее используют, как результативное средство закрепления слабых горных пород при возведении тоннелей и коллекторов. Также она часто применяется при строительстве ограждения котлованов в обводненных породах, при создании противодиффузионных завес, с целью повышения прочности фундаментов при реконструкции и постройке зданий. Так же только этот уникальный метод дает возможность закрепить породы в основании плитных фундаментов, закрепить неустойчивые склоны и откосы, избавиться от карстовых полостей в трещиноватых скальных породах.

Традиционно работы с применением гидроструйной цементации сводятся к эксплуатации специализированной буровой установки, пробуривающей скважину на необходимую глубину, с последующей подачей под высоким давлением водцементного раствора через вращающийся буровой став в направлении перпендикулярном оси пробуренной скважины и одновременным подъемом бурового инструмента до проектной отметки.

Таким образом, в толще горной породы формируется тело цилиндрической формы, состоящее из тонкодисперсной смеси водцементного раствора и горной породы. Через определенное время происходит схватывание и окончательное твердение смеси с образованием колонны из нового материала – породобетона.

Разработка оборудования

Известны работы по созданию в толще горных пород и плоских породобетонных конструкций, получаемых путем многократного

возвратно-поступательного перемещения без вращения струеформирующего инструмента вдоль предварительно пробуренной пилотной скважины.

Данное техническое решение позволило предположить, что для создания плоских протяженных породобетонных конструкций (например, для дорожного строительства) метод гидроструйной цементации будет также крайне эффективен.

Неслучайно поэтому, коллективом ученых и специалистов ТулГУ были выполнены исследования, направленные на установление основных закономерностей получения закрепленных породобетонных конструкций без погружения струеформирующего инструмента в горную породу.

Принципиально, работы по гидроструйной цементации дорожного полотна могут проводиться при расположении струеформирующего устройства, как непосредственно на поверхности грунта, так и некотором расстоянии от поверхности. Первая схема более предпочтительна с точки зрения увеличения эффективности воздействия на закрепляемый массив и уменьшения потерь водцементного раствора на разбрызгивание при входе струи в грунт, поэтому к рассмотрению был принят именно этот случай.

Процесс гидроструйной цементации рис. 1 осуществляется следующим образом: в струеформирующее устройство (диаметром d_0 , коэффициентом расхода μ) осуществляется подача водцементного раствора (с плотностью ρ) под высоким давлением P . После этого осуществляется перемещение струеформирующего устройства со скоростью V по поверхности закрепляемого массива.

После затвердевания, формируется закрепленный массив треугольного сечения глубиной h и углом при вершине γ .

Все перечисленные факторы процесса гидроструйной цементации можно разделить на следующие группы:

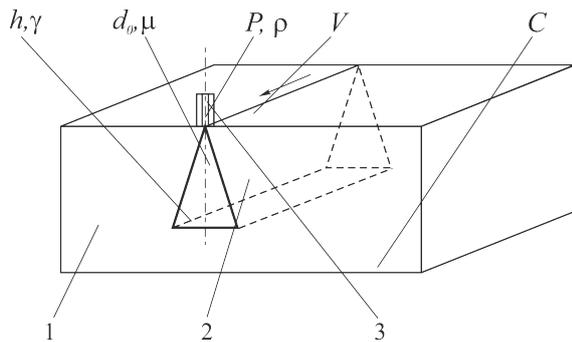


Рис. 1. Схема гидроструйной цементации дорожного полотна:

1 – закрепляемое полотно;
2 – породобетон; 3 – струеформирующая насадка.

- конструктивные: коэффициент расхода водоцементной суспензии через струеформирующую насадку μ , диаметр отверстия струеформирующей насадки d_0 ;

- режимные: плотность водоцементной суспензии ρ , скорость перемещения инструмента V , давление водоцементной суспензии P ;

- физико-механические свойства горных пород (на основе анализа данных литературных источников в качестве критерия, характеризующего сопротивляемость грунтов гидроструйному воздействию был принят C - коэффициент сцепления горной породы).

В качестве основных критериев оценки эффективности процесса ГСЦ горных пород были приняты следующие показатели: глубина закрепления h , скорость приращения объема закрепляемого массива G_0 (производительность) и удельная энергоёмкость процесса ГСЦ грунтов E_0 .

Скорость приращения объема закрепляемого массива G_0 ($\text{м}^3/\text{с}$) рассчитывалась как произведение скорости перемещения инструмента на площадь закрепляемого массива и определялась по формуле:

$$G_0 = Vh^2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}, \quad (1)$$

где h – глубина цементации, м; γ - угол при вершине закрепляемого массива, град.; V – скорость перемещения инструмента, м/с.

Удельная энергоёмкость процесса ГСЦ горных пород E_0 ($\text{МДж}/\text{м}^3$) определяется по формуле:

$$E_0 = \frac{N}{G_0}, \quad (2)$$

где N – потребляемая гидравлическая мощность насосной установки, МВт;

В свою очередь, потребляемая гидравлическая мощность определяется по формуле известной из курса гидравлики:

$$N = 1,11Pd_0^2\mu\sqrt{\frac{P}{\rho}}, \quad (3)$$

где P - давление цементного раствора перед насадкой, МПа; d_0 – диаметр струеформирующей насадки, м; μ - коэффициент расхода через насадку (в нашем случае $\mu = 0,75$); g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ – плотность водоцементной суспензии, $\text{кг}/\text{м}^3$.

По результатам выполненных на лабораторном стенде экспериментальных исследований были получены функциональная зависимость для определения рациональной скорости перемещения инструмента, соответствующей области минимальной энергоёмкости процесса и максимальной скорости приращения объема закрепляемого массива:

$$V_{\text{рац}} = 0,01 \frac{P^{0,05} d_0^{0,03}}{C^{0,03}}, \quad (4)$$

а также обобщенная формула для расчета глубины закрепляемого массива:

$$h = 0,17 \frac{d_0^{1,2} P^{1,2}}{V^{0,4} C^{0,3}}. \quad (5)$$

Таким образом, полученные зависимости позволяют обоснованно задавать конструктивные параметры оборудования для закрепления дорожного полотна методом гидроструйной цементации и технологические режимы эксплуатации этого оборудования, обеспечивающие требуемые показатели процесса.

Для реализации идеи закрепления дорожного полотна методом гидроструйной цементации был выполнен эскизный проект цементующей машины, представленной на рис. 2.

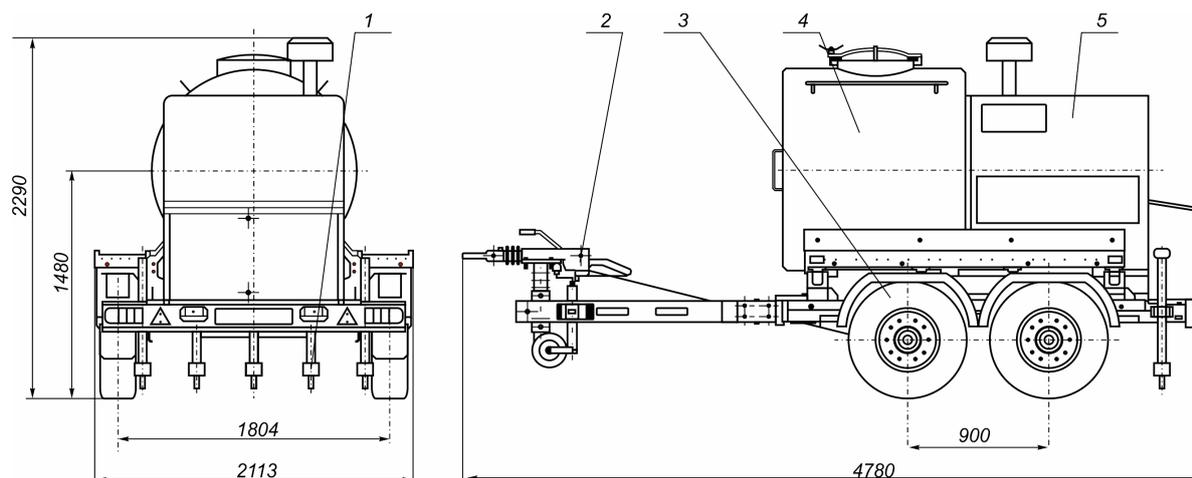


Рис. 2. Цементирующая гидроструйная машина ЦГМ-1.

Цементирующая гидроструйная машина представляет собой агрегат, состоящий из бункера-смесителя для водоцементного раствора 4, дизель-насосной установки 5 смонтированных на базе легкового автомобильного прицепа 3. Дизель-насосная установка 5 забирая водоцементный раствор из бункера-смесителя 4 осуществляет питание гребенки 1 из пяти гидроструйных инструментов, непосредственно осуществляющих обработку дорожного полотна. Универсальное прицепное устройство 2 обеспечивает стыковку машины с различными типами строительной, строительного-дорожной или универсальной техники.

Заключение

Разработка отечественного оборудования, насколько нам известно, не имеющего зарубежных аналогов, для гидроструйной цементации дорожного полотна позволит существенно упростить технологию возведения современных магистралей путем отказа от сложных в установке георешеток без ухудшения эксплуатационных характеристик дорожных оснований.

Литература

1. Головин К.А., Ковалев Р.А., Пушкарев А.Е. О применении метода гидроструйной цементации пород в горном деле // Горный журнал, №6, 2008. – С. 60-63.

2. Головин К.А., Лежебоков А.В., Назаров А.П. Исследование технологии гидроструйной цементации двухкомпонентными водоцементными струями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 12-2. – С. 349-353.

3. Головин К.А., Белякова Е.В., Лежебоков А.В., Назаров А.П., Пушкарев А.Е. Специальные способы ведения работ в неустойчивых горных породах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 12-2. – С. 354-359.

4. Пleshko М.С., Вчерашина Ю.В., Копылов А.Б. Эффективные составы бетонов для транспортного и подземного строительства // Транспортное строительство. 2013. № 3. – С. 31-32

References

1. Golovin K.A., Kovalev R.A., Pushkarev A.E. O primeneniі metoda gidrostrujnoj cementacii porod v gornom dele [On the application of the method of jetting grouting rock mining] // Gornyj zhurnal [Mining Journal], №6, 2008. – P. 60-63.

2. Golovin K.A., Lezhebokov A.V., Nazarov A.P. Issledovanie tehnologii gidrostrujnoj cementacii dvuhkomponentnymi vodocementnymi strujami [Research technology jetting two-component water-cement grouting jets] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki [Proceedings of the Tula State University. Technical sciences]. 2012. № 12-2. – P. 349-353.

3. Golovin K.A., Beljakova E.V., Lezhebokov A.V., Nazarov A.P., Pushkarev A.E. Special'nye sposoby vedenija rabot v neustojchivyh gornyh porodah [Special methods of work in unstable rocks] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki [Proceedings of the Tula State University. Technical sciences]. 2012. № 12-2. – P. 354-359.

4. Pleshko M.S., Vcherashnjaja Ju.V., Kopylov A.B. Jefferktivnye sostavy betonov dlja transportnogo i podzemnogo stroitel'stva [Effective preparations for the transport of concrete and underground construction] // Transportnoe stroitel'stvo [Transport construction]. 2013. № 3. – P. 31-32.

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2015 г.

Афонский Игорь Владимирович – аспирант ФГОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия. E-mail: er-igor89@mail.ru

Головин Константин Александрович – д-р техн. наук, проф. ФГОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия. E-mail: kagolovin@ibox.ru

Ковалев Роман Анатольевич – д-р техн. наук, проф., директор института Горного дела и строительства ФГОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия. E-mail: kovalevdekan@mail.ru

Каишковский Николай Владимирович – соискатель ФГОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия. E-mail: dep-142@mail.ru

Afonskiy Igor Vladimirovich – graduate student, Tula State University, Tula, Russia. E-mail: er-igor89@mail.ru

Golovin Konstantin Aleksandrovich – Professor, Tula State University, Tula, Russia. E-mail: kagolovin@ibox.ru

Kovalev Roman Anatoljevich – Professor, Tula State University, Tula, Russia. E-mail: kovalevdekan@mail.ru

Kashkovskiy Nikolay Vvdimirovich – applicant, Tula State University, Tula, Russia. E-mail: dep-142@mail.ru