

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕРНИЗАЦИИ МАШИН ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВ

Э.Ю. Давыдова¹, А.Е. Пушкарев²

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия

¹ lady.eleanora@mail.ru

² pushkarev-agn@mail.ru

Аннотация. Метод гидроструйной цементации (ГСЦ) применяется для упрочнения неустойчивых грунтов. Качество работ напрямую зависит от параметров машин, формирующих цементирующую струю. Необходим научный подход к обоснованию характеристик оборудования и режимов ГСЦ. Использование аналитических методов позволяет оценить технический уровень машин и создать базу для проектирования техники нового поколения с повышенной эффективностью.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ обучающимися СПбГАСУ (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет») в 2025 году.

Ключевые слова: гидроструйная цементация, технический уровень, оценка оборудования, алгоритм сравнения, безэкспертный метод, повышение эффективности.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF MODERNIZATION OF MACHINES FOR JET GROUTING OF SOILS

E.Y. Davydova¹, A.E. Pushkarev²

^{1,2} Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
Saint-Petersburg, Russia

¹ lady.eleanora@mail.ru

² pushkarev-agn@mail.ru

Abstract. The hydro-jet grouting (HJC) method is used for strengthening unstable soils. The quality of work directly depends on the parameters of the machines that form the cementing jet. Scientific approach to justification of equipment characteristics and HCC modes is necessary. The use of expert and analytical methods allows estimating the technical level of machines. This creates a basis for designing new generation machines with increased efficiency.

The article is published based on the results of the research work carried out within the framework of the contest of grants for the performance of research work by students of SPbGASU (FGBOU VO "St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering") in 2025.

Keywords: Hydrojet grouting, technical level, equipment evaluation, comparison algorithm, expert-free method, efficiency improvement.

Гидроструйная цементация (ГСЦ) представляет собой эффективный метод

упрочнения неустойчивых грунтов за счёт разрушения массива высокоскоростной струёй водоцементного раствора и одновременного его замещения. Для объективной оценки оборудования необходимо выделение ключевых параметров, характеризующих его производительность, универсальность, надёжность и адаптацию к различным условиям эксплуатации.

В качестве методики использовался широко известный комплексный метод оценки технического уровня на основе средневзвешенного арифметического показателя. Принципиальный подход в оценке технического уровня основан на сравнении значений соответствующих показателей лучших мировых аналогов, учете значимости каждого показателя в условиях эксплуатации, определении комплексного показателя технического уровня (КПТУ) и принятии заключения о соответствии продукции современному мировому техническому уровню.

Анализ современного рынка оборудования для гидроструйной цементации (ГСЦ) позволил выделить 15 ключевых параметров, определяющих технический уровень машин. К наиболее значимым характеристикам относятся:

- ширина типоразмерного ряда буровых установок (по мощности N), кВт;
- наполненность типоразмерного ряда n моделями буровых установок;
- давление водоцементного раствора, бар;
- крутящий момент, реализуемый при бурении, max , $N \cdot \text{м}$;
- давление воздуха, бар;
- расход водоцементного раствора, л/мин;
- диаметр возводимой колонны, (single fluid), м;
- диаметр возводимой колонны, (double fluid), м;
- мощность водоцементного насоса, кВт;
- давление водоцементного насоса (max), бар;
- подача водоцементного насоса (max), л/мин;
- ширина типоразмерного ряда водоцементных насосов (по давлению);
- наполненность типоразмерного ряда водоцементных насосов;
- производительность смесителей по цементу, м³/час;
- наполненность ряда по диаметрам технологического инструмента, n моделей.

Оценка результативности модернизации машин для гидроструйной цементации (ГСЦ) основана на комплексном подходе к определению их технического уровня. Для этого используются как экспертные, так и безэкспертные методы анализа, позволяющие объективно сравнивать существующие и модернизированные модели оборудования.

Экспертный метод подвержен субъективности и не всегда позволяет точно определить направления для технического улучшения машины. Поэтому для устранения субъективного влияния будет использован безэкспертный подход, реализованный в виде алгоритма посредством использования специального программного обеспечения. Преимуществом данного подхода заключается в том, что разработанная программа последовательно анализирует различные комбина-

ции параметров с учётом всех возможных распределений приоритетов. В алгоритме производится нормализация параметров, генерация множества вероятностных распределений значимости и оценка эффективности действия каждой машины на основе заданных критериев. На выходе формируется рейтинг машин, при этом устанавливаются зависимости между отдельными параметрами и итоговым показателем технического уровня [4].

К анализу представлены установки ГСЦ 6 компаний-производителей. Оценка эффективности отдельно взятой машины проводится по 9 ключевым параметрам [2], среди которых ширина ряда по мощности (К1), наполненность ряда (К2, К5), максимальная глубина бурения (К3), ширина ряда по диаметрам (К4), давление раствора (К6), ширина ряда по крутящему моменту (К7), наполненность ряда (насос) (К8) и производительность (К9).

В таблице 1.1 представлены технические характеристики всех 6 машин согласно официальным источникам.

Таблица 1 – Технические характеристики машин ГСЦ

Обозначение	Ширина ряда по мощности, кВт (К1)	Наполненность ряда, шт (К2)	Максимальная глубина бурения, м (К3)	Ширина ряда по диаметрам, мм (К4)	Наполненность ряда, шт (К5)	Давление раствора, бар (К6)	Ширина ряда по крутящему моменту, Нм (К7)	Наполненность ряда (насос), шт (К8)	Производительность, м ³ /час (К9)
А	194	8	68	114	5	600	20000	5	30
Б	205	8	55	127	5	600	36590	5	30
В	570	8	82	114,3	5	600	39000	1	40
Г	129	6	200	305	7	250	17000	1	40
Д	227	14	390	260	14	39	46150	10	35
Е	117	11	300	300	11	200	11000	4	90

Обработка массива технических параметров показала, что в большинстве случаев машина «Д» имеет наивысший технический уровень (157202 положительных итогов) и является эталонным показателем.

При этом имеются два конкурента – машины «Е» и «В» – (70744 и 58432 положительных итогов). Их плотность результатов расчета велика, что говорит о высоком уровне конкуренции в этой группе техники.

Ключевым параметром является ширина ряда по мощности (К1).

В целях повышения эффективности машины «В» были внесены изменения в один из рабочих параметров – К1, влияющий на диаметр и однородность колонны, глубину обработки грунта и расход цементного раствора. В рассматриваемом случае увеличение данного показателя способствует повышению эффективности машины. Результаты выполнения расчетов показаны на рисунке 1.



Рисунок 1 – Результаты проведения расчетов путем применения алгоритма оценки технического уровня техники ГСЦ с учетом внесения изменений в некоторые параметры машин

Анализ диаграммы показывает, что в условиях установленной системы ограничений и при прочих равных параметрах изменение одного из эксплуатационных показателей машины может привести к перераспределению позиций в иерархии исследуемых образцов техники, а в отдельных случаях – к выделению соответствующего образца в качестве эталонного. Выявленная зависимость подтверждает обоснованность предложенного алгоритма оценки технического уровня машин, в частности установок ГСЦ, и определяет перспективные направления их дальнейшего совершенствования.

Таким образом, проведённое исследование продемонстрировало эффективность предложенного алгоритма оценки технического уровня оборудования для гидроструйной цементации. Установленная зависимость между отдельными характеристиками и итоговым рейтингом машин свидетельствует о возможности целенаправленного улучшения их технического уровня. Полученные результаты могут быть использованы как для обоснования проектных решений, так и для формирования стратегии технического развития отрасли. Алгоритм также открывает перспективы автоматизированного подбора оборудования под конкретные условия эксплуатации.

Список литературы

1. Головин К.А. К вопросу о разработке быстротвердеющих смесей для гидроструйной цементации плоскостных сооружений / К.А. Головин, Р.А. Ковалев, А.С. Киреева // Вестник науки и образования. – 2019. – № 3 (57). – С. 30–33.
2. Мейке, У.Н. Методы прогнозирования и оценки технического уровня наземных транспортно-технологических машин / У.Н. Мейке // Сборник научных трудов молодых учёных Кафедры наземных транспортно-технологических машин – Санкт-Петербург : Петрополис, 2017. – Вып. без номера. – С. 85–97.
3. Склярова А.А., Пушкарев А.Е. Научно обоснованный подход к оценке технического уровня машин ГНБ в заданной системе ограничений // Строительные и дорожные машины. – 2023. – № 8. – С.25–31.

4. Склярова А.А., Пушкарев А.Е. Обоснование параметров взаимодействия технологического инструмента машины горизонтально направленного бурения с рабочей средой : специальность 2.5.11 «Наземные транспортно-технологические средства и комплексы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Склярова Анастасия Алексеевна ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург, 2024. – 158 с.

5. Терентьев А. В., Беляев А. И., Абросимова А. А., Шиманова А. А. Технология производства и восстановления наземных транспортно-технологических машин : учеб. пособие / А. В. Терентьев, А. И. Беляев, А. А. Абросимова, А. А. Шиманова. – Санкт-Петербург : Петрополис, 2022. – 168 с.

References

1. Golovin, K.A. Towards the development of quick-hardening mixtures for hydro-jet grouting of planar structures / K.A. Golovin, R.A. Kovalev, A.S. Kireeva // Bulletin of Science and Education. – 2019. – № 3 (57). – С. 30–33.

2. Meike, U.N. Methods of forecasting and evaluation of the technical level of land transport-technological machines / U.N. Meike // Collection of scientific papers of young scientists of the Department of land transport-technological machines - Saint-Petersburg : Petropolis, 2017. – Вып. unnumbered. – С. 85–97.

3. Sklyarova, A.A.; Pushkarev, A.E. Scientifically grounded approach to the evaluation of the technical level of the HDD machines in a given system of constraints // Stroitelnye i rozhnye mashiny // Construction and road machines. – 2023. – № 8. – С.25–31.

4. Sklyarova A.A., Pushkarev A.E. Justification of parameters of interaction of the technological tool of the machine of horizontally directed drilling with the working environment : speciality 2.5.11 "Land transport-technological means and complexes" : thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences / Sklyarova Anastasia Alekseevna ; Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. – Saint-Petersburg, 2024. – 158 с.

5. Terentyev, A. A. Terentyev A. V., Belyaev A. I., Abrosimova A. A., Shimanova A. A. Technology of production and restoration of land transport and technological machines : textbook / A. V. Terentyev, A. I. Belyaev, A. A. Abrosimova, A. A. Shimanova. – Saint-Petersburg : Petropolis, 2022. – 168 с.