

ОЦЕНКА И ПРИОРИТЕЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРОСТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕЗЭКСПЕРТНОГО МЕТОДА

Давыдова Э.Ю., Пушкарёв А.Е.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гидроструйная цементация, безэкспертная оценка параметров, группировка по подсистемам, коэффициент результативности, мощность насоса, крутящий момент буровой машины, давление раствора, конкурентоспособность машин.

Аннотация. В статье рассматривается актуальный подход к выявлению наиболее значимых технических параметров оборудования для гидроструйной цементации, оказывающих определяющее влияние на его конкурентоспособность. Предложен метод оценки, основанный на безэкспертном анализе, позволяющий определить приоритетные направления модернизации. Метод основан на поэтапном улучшении каждого параметра в рамках заданного диапазона и анализе изменения итоговых рейтингов технического уровня. Исследование охватывает шесть моделей установок различных производителей, которые анализируются по восьми ключевым характеристикам, сгруппированным по трём функциональным подсистемам. В результате сделан вывод о целесообразности приоритетного улучшения тех параметров, которые демонстрируют максимальную результативность, выражающуюся в росте эффективности оборудования. Представленные результаты имеют практическое значение для инженеров-конструкторов, технологов и руководителей производственных подразделений, принимающих решения о модернизации оборудования.

EVALUATION AND PRIORITIZATION OF TECHNICAL PARAMETERS OF JET GROUTING EQUIPMENT BASED ON A NON-EXPERT METHOD

Davydova E.Yu., Pushkarev A.E.

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: jet grouting, non-expert assessment, subsystem grouping, performance coefficient, pump power, drilling machine torque, solution pressure, machine competitiveness.

Abstract. The article considers a relevant approach to identifying the most significant technical parameters of equipment for jet grouting, which have a determining effect on its competitive-ness. A quantitative assessment method based on non-expert analysis is proposed to determine the priority directions for modernization. The method is based on step-by-step improvement of each parameter within a given range and analysis of changes in the final technical level ratings. The study covers six models of equipment from different manufacturers, which are analyzed based on eight key characteristics grouped into three functional subsystems. As a result, a conclusion is drawn about the advisability of improving those parameters that demonstrate the greatest efficiency gain. The results presented are of practical value for design engineers, technologists, and production managers making decisions on equipment modernization.

Введение

Гидроструйная цементация (ГСЦ) представляет собой современную технологию упрочнения неустойчивых грунтов, основанную на разрушении массива грунта высокоскоростной струёй водоцементного раствора с последующим его замещением. Этот метод активно применяется при строительстве зданий и инженерных сооружений в сложных геологических условиях [1, 2]. Эффективность ГСЦ во многом определяется техническими характеристиками оборудования, которое используется для выполнения работ. В условиях высокой конкуренции среди производителей оборудования возникает необходимость объективной оценки технического уровня машин и их модернизации для повышения конкурентоспособности. При этом традиционные методы оценки часто включают субъективный экспертный анализ, что снижает точность результатов [3, 4]. В связи с этим актуальным является развитие безэкспертных подходов, которые позволяют проводить

количественную оценку и приоритезацию технических параметров оборудования для его дальнейшего совершенствования [5].

Материалы и методы исследований

Для объективного анализа параметров оборудования гидроструйной цементации и выявления их влияния на эффективность работы использована аналитическая модель, обеспечивающая высокую достоверность результатов при большом объёме вычислений. Модель позволяет оценивать как отдельные установки, так и сравнивать их между собой, определяя эталонные образцы по числу положительных исходов. Также она даёт возможность варьировать параметры и отслеживать, как меняется положение машины в рейтинге, что позволяет выделить приоритетные направления для модернизации [6, 7]. Каждая установка оценивалась по восьми основным техническим характеристикам [8, 9]: максимальная глубина (K1), давление раствора (K2), крутящий момент (K3), давление воздуха (K4), расход раствора (K5), диаметр колонны (K6), мощность насоса (K7) и производительность смесителя (K8) (табл. 1).

Табл. 1. Технические характеристики машин ГСЦ

Обозначение	Максимальная глубина (K1), м	Давление раствора (K2), бар	Крутящий момент (K3), Н·м	Давление воздуха (K4), бар	Расход раствора (K5), л/мин	Диаметр колонны (K6), м	Мощность насоса (K7), кВт	Производительность смесителя (K8), м ³ /час
А	68	600	20000	15	460	1	522	30
Б	55	600	36590	12	320	1	746	30
В	82	600	39000	6	550	1	600	40
Г	200	250	17000	12	300	1,2	600	40
Д	300	30	35500	6	250	1	165	27
Е	180	250	11000	8	400	1,2	130	50

Результаты

В результате обработки массива технических параметров было выявлено, что в большинстве случаев машина «Б» имеет наивысший технический уровень (103272 положительных итогов) и является эталонным показателем. При этом имеются два конкурента – машины «Д» и «А» – (89273 и 65221 положительных итогов).

Целью дальнейшего анализа стало определение критериев, которые за счет их изменения от 5% до 30% позволят модернизировать ту или иную машину таким образом, чтобы она стала более конкурентоспособной. Для этого были рассчитаны коэффициенты результативности, а сами параметры были логически объединены в три функциональные системы [10]: системы насоса (K7, K8), бурильной машины (K1, K3), приготовления и подачи раствора (K2, K4, K5, K6) (табл. 2).

Графическое отображение представленных расчетов показано на рисунках 1-3.

Табл. 2. Результаты расчета результативности модернизации машины посредством изменения ключевого параметра

Ключевой параметр	Показатель результативности модернизации машины посредством изменения ключевого параметра, Кр					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Бурильная машина						
K1	0,47	0,68	0,44	0,01	0,12	0,19
K3	0,58	1,22	0,92	0,97	0,82	0,84

Табл. 2. Продолжение

Ключевой параметр	Показатель результативности модернизации машины посредством изменения ключевого параметра, Кр					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Насос						
К7	0,42	0,64	0,65	0,66	1,78	1,88
К8	0,73	0,75	0,65	0,58	0,59	0,99
Система приготовления и подачи цементного раствора						
К2	2,47	1,86	1,15	1,26	1,1	1,06
К4	0,71	0,76	0,98	1,08	0,99	0,92
К5	0,46	1,21	0,98	1,06	0,93	0,92
К6	1,07	0,54	0,64	0,48	0,6	0,84

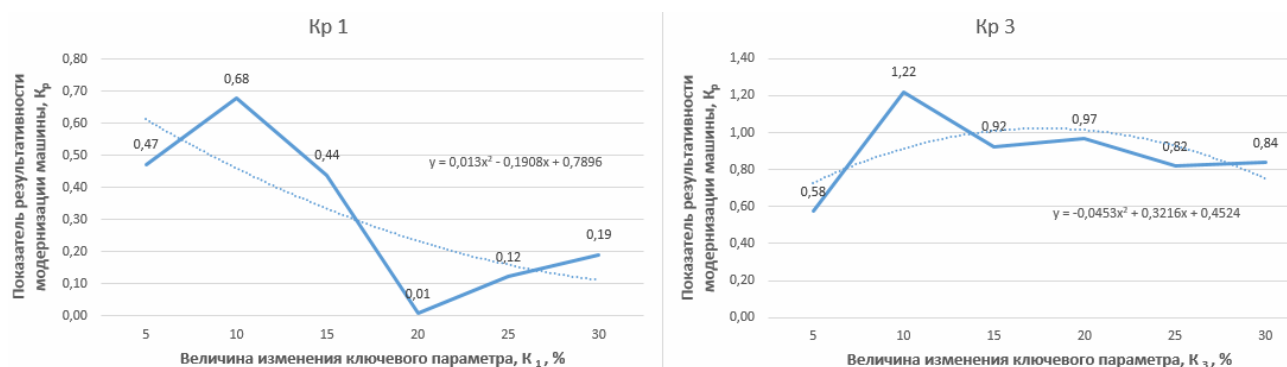


Рис. 1. Зависимость изменения показателя результативности модернизации машин посредством изменения параметров бурильной машины К1, К3

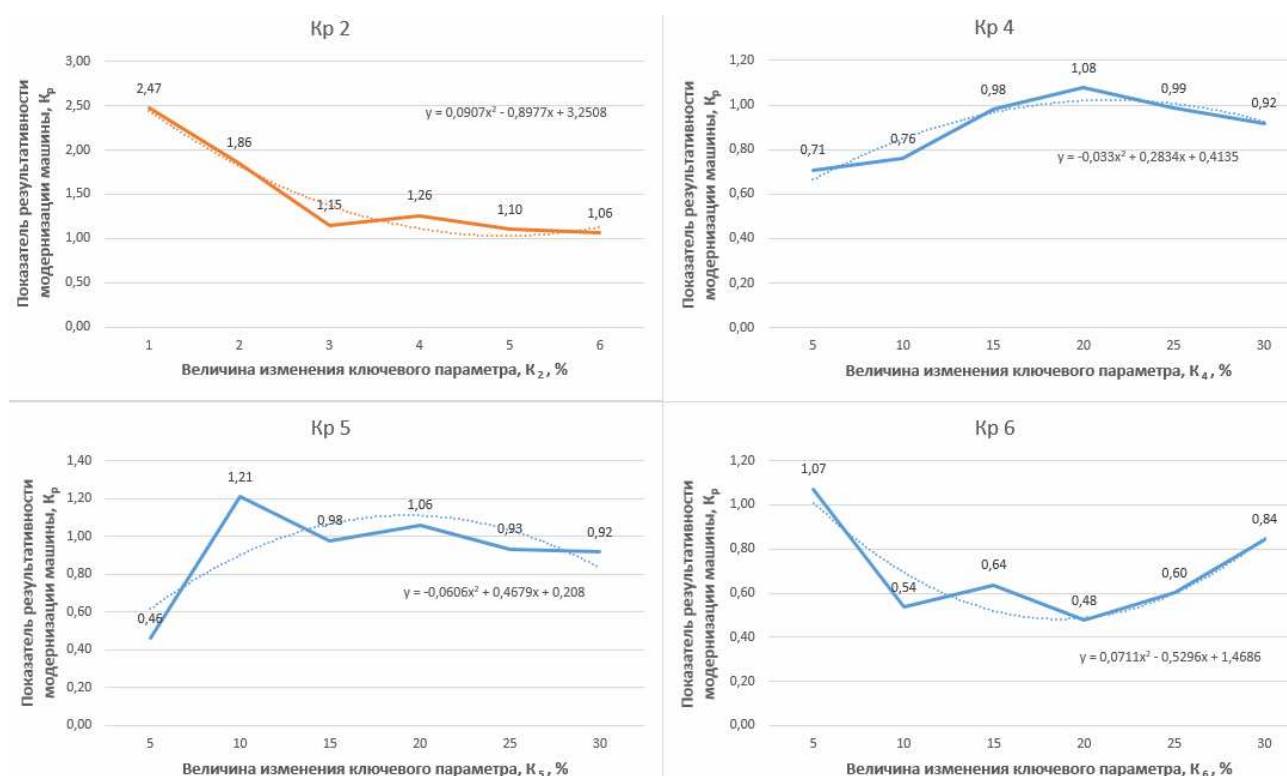


Рис. 2. Зависимость изменения показателя результативности модернизации машин посредством изменения параметров системы приготовления и подачи цементного раствора К2, К4, К5, К6

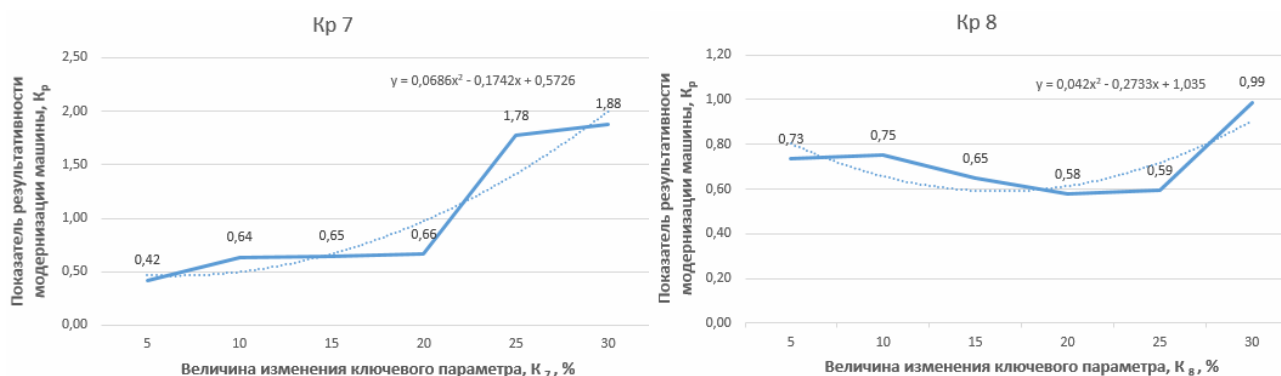


Рис. 3. Зависимость изменения показателя результативности модернизации машин посредством изменения параметров насоса К7, К8

Выводы

По результатам расчётов коэффициентов результативности (Кр) установлено следующее.

1. В системе насоса параметр К7 (мощность насоса) продемонстрировал устойчивый рост результативности при увеличении от 5% до 30%, достигая максимума 1,88. Это означает, что модернизация насосного агрегата с увеличением его мощности оказывает заметное влияние на общую конкурентоспособность машин. В то же время параметр К8 (производительность смесителя) показал максимум на уровне 0,99, что свидетельствует о его умеренном влиянии. Несмотря на техническую значимость данного узла, рост его параметров не приводит к столь же значимому эффекту, как в случае с мощностью насоса.

2. В системе бурильной машины выраженное влияние оказал только один параметр К3 (крутящий момент), достигший коэффициента результативности 1,22 уже при приросте на 10-15%. Это подчёркивает важность обеспечения высоких показателей крутящего момента для работы в плотных и неоднородных грунтах. Параметр К1 (производительность смесителя) оказался наименее результативным: при его увеличении результативность падала почти до нуля. Это свидетельствует о том, что данный параметр не является определяющим для общего технического уровня машины, и его модернизация нецелесообразна.

3. В системе приготовления и подачи раствора наибольшую результативность среди всех исследованных параметров продемонстрировал К2 (давление раствора), с максимумом 2,47 уже при 5% увеличении. Такой эффект объясняется прямым влиянием давления на способность разрушать массив и качественно заполнять образованные полости раствором. Параметр К5 (расход раствора) также продемонстрировал высокую эффективность (до 1,21) при приросте на 10-15%. Кроме того, К4 (давление воздуха) показал положительный эффект (до 1,08), особенно в системах, где подача раствора осуществляется с пневматической помощью. К6 (диаметр колонны) продемонстрировал слабую и нестабильную динамику, в связи с чем его значение как объекта модернизации ограничено.

Заключение

Предложенный метод позволяет выполнять количественную оценку и ранжирование технических параметров в зависимости от их влияния на общую эффективность работы оборудования, что особенно актуально в условиях ограниченного бюджета, необходимости оптимизации затрат и высокой конкуренции на рынке специализированной техники. Это делает возможным более обоснованное принятие решений на этапах проектирования, модернизации и эксплуатации машин.

Результаты анализа подтверждают, что наибольшее влияние на повышение технического уровня оказывают такие параметры, как давление раствора, мощность насоса и крутящий момент бурильной машины. Целенаправленное улучшение этих характеристик обеспечивает максимальный прирост эффективности установки при минимально возможных инвестиционных затратах, что делает их ключевыми ориентирами для последующей технической модернизации.

Практическая ценность предложенной методики заключается в её универсальности и применимости на разных этапах жизненного цикла оборудования. Она может быть использована при обосновании модернизации существующих машин, проектировании новых установок, а также при подготовке инвестиционных и производственных решений. Метод представляет интерес для инженеров-конструкторов, технологов, специалистов по технической эксплуатации, а также для руководителей производственных подразделений, ответственных за развитие и повышение конкурентоспособности оборудования.

Таким образом, внедрение данного подхода в инженерную практику позволяет повысить качество технических решений, оптимизировать расходы и повысить общую результативность применения гидроструйной цементации в строительных и инженерных проектах.

Финансирование. 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.

Список литературы

1. Зуев С.С., Рубцова С.С., Маковецкий О.А. О возможности применения технологии струйной цементации грунта в зоне многолетнемерзлых грунтов // Гидротехника. – 2023. – №2. – С. 57-61.
2. Куракина Е.В. Эффективность использования наземных транспортно-технологических машин // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – 2016. – №3(56). – С. 203-208.
3. Афанасьев А.С., Пушкарев А.Е. Практика применения метода экспертных оценок для обоснования параметров технологических машин // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021: сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 139-143.
4. Репин С.В. Методология совершенствования эксплуатации строительных машин: монография. – СПб.: СПбГАСУ, 2005. – 164 с.
5. Мейке У.Н. Методы прогнозирования и оценки технического уровня наземных транспортно-технологических машин // Сборник научных трудов кафедры наземных транспортно-технологических машин. – СПб.: Петрополис, 2017. – С. 85-97.
6. 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.
7. СклЯрова А.А. Обоснование параметров взаимодействия технологического инструмента машины горизонтально направленного бурения с рабочей средой: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – 158 с.
8. Глебов А.В. Определение значимости показателей при оценке уровня качества геотехники // Известия Тульского государственного университета. – 2021. – №1. – С. 123-137.
9. Кришталь Н.В. Методы оценки стратегической конкурентоспособности машиностроительной продукции: дисс. ... канд. экон. наук. – СПб.: СПбГИЭУ, 2006. – 183 с.
10. Смирнова О.В. Оценка конкурентоспособности продукции // Научные труды Вольного экономического общества России. – 2010. – Т. 137. – С. 642-648.

References

1. Zuev S.S., Rubtsova S.S., Makovetsky O.A. On the possibility of applying jet grouting technology in permafrost soil zones // Hydrotechnics. 2023, no. 2, pp. 57-61.
2. Kurakina E.V. Efficiency of using ground transport and technological machines // Bulletin of Civil Engineers SPbGASU. 2016, no. 3(56), pp. 203-208.
3. Afanasev A. S., Pushkarev A. E. Application of expert evaluation method for substantiating the parameters of technological machines // Innovations and Prospects of Development in Mining Engineering and Electromechanics (IPDME-2021): Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference. – SPb.: Saint-Petersburg Mining University, 2021. – P. 139-143.
4. Repin S.V. Methodology for improving the operation of construction machines: monograph. – SPb.: SPbSUACE, 2005. – 164 p.
5. Meike U.N. Methods for forecasting and assessing the technical level of ground transport and technological machines // Collected scientific works of the Department of Ground Transport and Technological Machines. – SPb.: Petropolis, 2017. – P. 85-97.
6. Sklyarova A.A., Pushkarev A.E. Scientifically grounded approach to assessing the technical level of HDD machines under given constraints // Construction and Road Machines. 2023, no. 8, pp. 25-31.

7. Sklyarova A.A. Substantiation of parameters of interaction of a technological tool of a horizontal directional drilling machine with the working environment: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – SPb.: Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2024. – 158 p.
8. Glebov A.V. Determining the significance of indicators in assessing the quality level of geotechnics // News of Tula State University. 2021, no. 1, pp. 123-137.
9. Kryshchal N. V. Methods for assessing the strategic competitiveness of engineering products: diss. ... cand. of econ. sc. – SPb.: SPbSEEU, 2006. – 183 p.
10. Smirnova O.V. Assessment of product competitiveness // Scientific Works of the Free Economic Society of Russia. 2010, vol. 137, pp. 642-648.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Давыдова Элеонора Юрьевна – студент	Davydova Eleonora Yuryevna – student
Пушкарев Александр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор	Pushkarev Aleksandr Evgenievich – doctor of technical sciences, professor
lady.eleanora@mail.ru	

Получена 15.07.2025