

## Применение шлакощелочных вяжущих в технологии устройства буроинъекционных свай

Ю.В. Кадушкин<sup>1</sup>, Н.В. Миклашевский<sup>1</sup>, С.А. Войнаш<sup>2,3</sup>, А.А. Ореховская<sup>2</sup>,  
Э.Ю. Абдуллазянов<sup>3</sup>, Л.С. Сабитов<sup>2,3</sup>, Р.Р. Загидуллин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,  
Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет, Казань

<sup>3</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань

**Аннотация:** В статье рассматриваются предложения по совершенствованию применения разрядно-импульсной технологии при устройстве буроинъекционных свай и камуфлетных уширений буронабивных свай диаметрами более 300 мм. Рассмотрено применение напряжений на электродной системе генератора импульсных токов от 10 до 50 кВ и электрической ёмкостью порядка 300 мкФ.

Установлено, что в случае применения относительно низкого напряжения на электродах и увеличение электрической ёмкости конденсаторной батареи в несколько раз увеличивается время действия давления ударной волны на грунт. Это способствует более интенсивному проникновению текучего твердеющего материала в межзерновое пространство околоскважинного грунтового массива.

В качестве твердеющего материала при формировании буроинъекционных свай предложено применять растворы с использованием шлакощелочных вяжущих. Такие растворы обладают большей текучестью по сравнению с цементными и при твердении образуют камень, обладающий большей прочностью и плотностью.

В статье приведены данные экспериментальных исследований, подтверждающие повышенную прочность ( $R = 130$  МПа) и морозостойкость раствора, приготовленного на шлакощелочных вяжущих, а также данные по определению их коррозионной стойкости к воздействию различных агрессивных сред, содержащихся в грунтовых водах.

Установлена возможность устойчивого пробоя межэлектродного промежутка в водных растворах шлакощелочных сред различных консистенций, определены оптимальные энергетические параметры разряда для максимального эффекта закрепления грунтов оснований фундаментов.

**Ключевые слова:** фундаменты, буроинъекционные сваи, разрядно-импульсная технология, шлакощелочные вяжущие.

**Введение.** Для усиления фундаментов при реконструкции зданий и сооружений применяются различные технологии, в том числе, и способы закрепления грунтов, оснований фундаментов. Данные технологии предусматривают бурение наклонных скважин небольшого диаметра под подошву фундамента, подачу в скважину твердеющих смесей различных

составов, и, путём создания в скважине избыточного статического давления, инъекцирование твердеющей смеси в околоскваженный грунт. В результате проникновения твердеющей смеси в межзерновое пространство на определенную глубину вокруг скважины, под фундаментом образуется зона закрепленного (сцементизированного) грунта, обладающего повышенной способностью к восприятию нагрузки от фундаментов здания. Зона закрепленного грунта зависит от дренирующих свойств грунта, величины и время действия избыточного давления на грунтовый массив, создаваемое насосным оборудованием [1-3]. С целью совершенствования способа инъекцирования твердеющих смесей в межзерновое пространство грунта вокруг скважины, был предложен способ создания динамического воздействия на процесс инъекцирования твердеющей смеси в межзерновое пространство грунта вокруг скважины. Для реализации этого процесса применяется энергия ударных волн сжатия, которые сопровождают процесс протекания высоковольтных разрядов в жидкости, так называемая разрядно-импульсная технология (РИТ) [4-6].

**Материалы, методы и объекты исследования.** Целью исследований являлось определение возможности и эффективности применения для упрочнения грунтов в околоскваженном пространстве твердеющей смеси, приготовленной на шлакощелочном вяжущем (ШЩВ), определение оптимальных параметров генератора импульсных токов (ГИТ) для увеличения времени протекания высоковольтного разряда в межэлектродном промежутке ГИТа с целью повышения длительности действия ударной волны сжатия на твердеющую смесь в скважине сваи и на окружающий сваю грунт. Исследовались составы твердеющей смеси на ШЩВ, их прочностные характеристики и устойчивость к воздействию агрессивных сред. Определены возможность и устойчивость протекания высоковольтных разрядов в водных растворах ШЩВ, определены оптимальные

---

энергетические параметры ГИТа для достижения максимального эффекта действия ударной волны сжатия на процесс инъектирования твердеющей смеси в межзерновое пространство грунта. В процессе выполнения исследований применялись методы натурального моделирования, лабораторные экспериментальные исследования с применением методов математического планирования [6, 7].

**Постановка задачи исследований.** Существуют 2 способа организации воспроизводства электрического разряда в межэлектродном промежутке. В первом случае электрический пробой межэлектродного зазора происходит за счёт создания напряжения, превышающего диэлектрическую проницаемость жидкой среды в межэлектродном промежутке (рис.1).

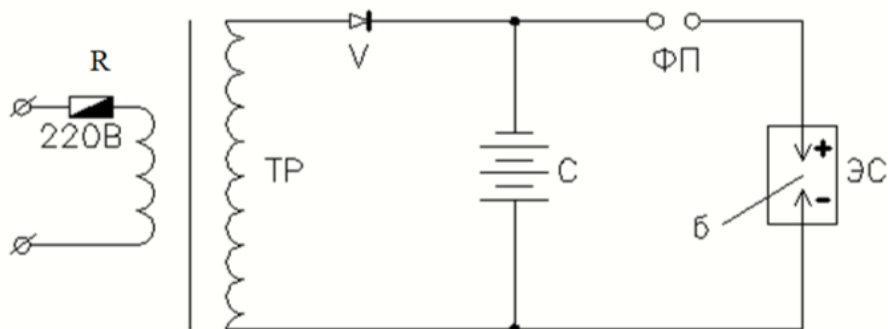


Рис. 1. Принципиальная схема устройства ГИТа:

ТР – импульсный трансформатор; V – высоковольтный выпрямитель;  
С – блок конденсаторов; ФП – формирующий искровой разрядник;  
ЭС – электродная система (излучатель энергии);  $\delta$  – межэлектродный зазор; R – зарядное сопротивление

Для создания требуемой напряженности на электродах требуется применение высоких напряжений (10 кВ). Для увеличения энергии разряда и, следовательно, давления во фронте ударной волны, сопровождающей высоковольтный разряд, иногда напряжение на электродах увеличивают до 50 кВ. При устройстве буронабивных свай, имеющих диаметры 300 и более мм и заполненные плотной бетонной смесью, такие режимы ГИТов оправданы, т.к. позволяют получать в канале разряда  $E \geq 50$  кДж, что делает

процесс образования камуфлетных уширений свай максимально эффективным. На характер распределения динамической энергии во фронте ударной волны на разделе фаз бетон в скважине «околоскваженный грунт» влияют несколько труднофиксируемых факторов (рис.2). Снижение величины динамического давления ( $P$ ) происходит с учетом коэффициента затихания, который меняется как в твердеющей смеси свай, так и в околоскваженном грунте после каждого разряда.

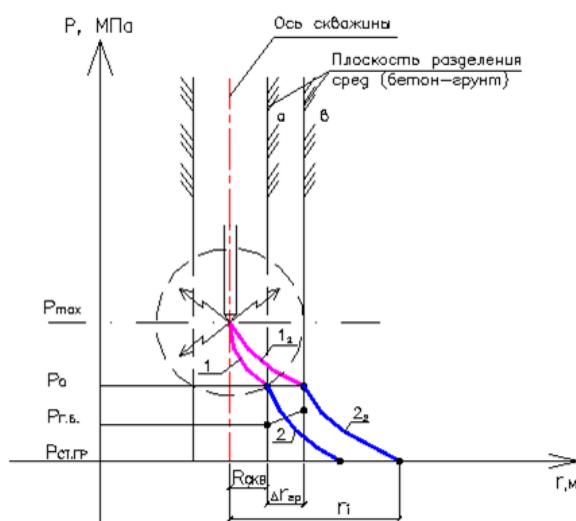


Рис. 2. Характер распределения динамического давления во фронте ударной волны сжатия в твердеющем материале свай и грунте. Плоскость раздела фаз (бетон-грунт), до электрического разряда (а) и после (в).

1 и 1а – изменения  $P_g$  в твердеющем материале до и после уширения скважин;

2 и 2а – изменение  $P_g$  в грунте до и после уширения;

$P_0$  – динамическое давление на стенку скважин;

$P_{г.б}$  – гидростатическое давление материала свай.

Установлено, что при неизменных исходных характеристиках твердеющей смеси и околоскваженного грунта, а также при фиксированной энергии электрического разряда  $E = 40$  кДж, давление в грунте на расстоянии одного метра от разрядника ГИТа составляет 3,8 – 4 МПа, на расстоянии 1,5 метра –  $P = 1,5$  МПа, что является достаточным для образования камуфлетного уширения буронабивных свай и качественного уплотнения бетонной смеси в

теле сваи. Следует отметить, что при использовании в качестве твердеющего состава материала свай жёстких бетонных смесей, особенно при устройстве буронабивных свай в связанных грунтах может возникать «обезвоживание» межэлектродного промежутка. Это приводит к нарушению стабильности разряда (задержки) и протекании пробоя в воздушной среде. Это увеличивает расход энергии и снижает величину давления во фронте ударной волны, т.к. плотность воздуха значительно ниже плотности жидкости. С целью стабилизации протекания высоковольтного разряда, некоторыми исследователями предлагается инициировать пробой путём замыкания электродов разрядника металлическим проводником или металлизированной пастой (например, алюминиевой) [8, 9]. Это позволяет увеличить величину межэлектродного зазора и применять более низкие напряжения на электродах (до 1000 В). Такое решение позволяет повысить эффективность образования камуфлетных уширений и уплотнения бетона в теле сваи за счёт образования объемного электровзрыва. К тому же, применение напряжений ниже 1000В снижает габариты применяемого оборудования и значительно упрощает его обслуживание. Однако, практическая реализация процесса замыкания межэлектродного зазора проводником или пастой в пяте тела сваи крайне затруднена. Устройство буроинъекционных свай, предназначенных для закрепления грунтов оснований под подошвой фундаментов, отличается от технологии устройства буронабивных свай (рис.3).

Буроинъекционные сваи имеют небольшой диаметр (не больше 150 мм) т.к. они не предназначены для восприятия больших вертикальных нагрузок. Скважины данных свай служат только для подачи твердеющей смеси под фундамент. В качестве твердеющей смеси целесообразно использовать растворные смеси (без крупного заполнителя), обладающие большой подвижностью (текучестью), способные проникать в межзерновое пространство грунтового массива.

---

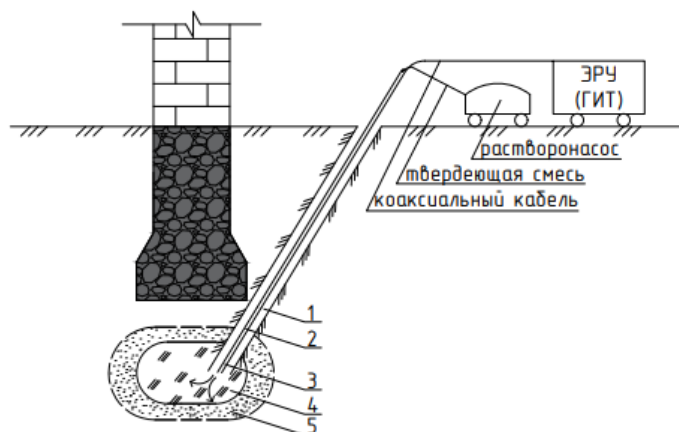


Рис. 3. Схема устройства буроинъекционных свай для закрепления грунтов под подошвой фундамента.

1. скважина, заполненная твердеющей смесью;
2. иньектор с коаксиальным высоковольтным кабелем;
3. разрядник (излучатель);
4. зона цементированного грунта;
5. зона уплотнённого грунта

Учитывая, что протекание электровзрыва в случае буроинъекционных свай происходит в непосредственной близости от реконструируемых фундаментов, применение высоковольтных разрядов большой мощности недопустимо, по причине возможного разрушения фундаментов. В случае устройства буроинъекционных свай основной задачей является не образование камуфлетных уширений, а иньектирование смеси в грунт. Для получения максимального эффекта целесообразно увеличить время действия ударной волны на твердеющую смесь. Увеличить время протекания электрического разряда можно путём увеличения ёмкости конденсатора с одновременным снижением напряжения на электродах ( $E=CU^2/2$  Дж). Таким образом, увеличивается время выделения мощности, а не её величина (рис.4).

На рис. 4 приведены диаграммы протекания процесса действия давления во фронте ударной волны при различных значениях напряжения на электродах  $V$  и ёмкости конденсатора  $C$ , при фиксированных значениях

остальных параметров ГИТа (межэлектродный зазор, электропроводность жидкости и пр.).

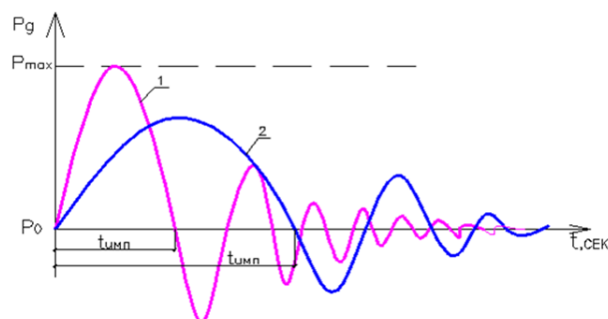


Рис. 4. Характер развития давления ( $P_g$ ) при фиксированных значениях  $b$ ,  $E$ .  
1 –  $P_g$  при  $U = 10$  кВ и  $C = 400$  мкФ  
2 –  $P_g$  при  $U = 5$  кВ и  $C = 2000$  мкФ

Как видно из графиков, увеличение электрической ёмкости конденсатора ГИТа до 2000 мкФ и напряжении на электродах  $V = 5$  кВ приводит к увеличению действия динамического давления  $P$  в 2,5 раза. При этом, радиус проникновения твердеющей смеси в грунт примерно в 1,5 раза больше, чем в случае применения высокого напряжения ( $V = 10$  кВ) и  $C = 400$  мкФ. Важным фактором эффективности инъектирования твердеющей смеси в межзерновое пространство грунта является её состав. Она должна обладать следующими свойствами:

1. Высокая подвижность, способствующая проникновению её в межзерновое пространство. Это достигается высокой тонкостью помола вяжущего, применением тонкодисперсного наполнителя. Также возможно применение эффективных пластифицирующих добавок.
2. Повышенная скорость набора прочности при твердении.
3. Высокая конечная прочность.
4. Высокая стойкость твердеющего камня к воздействию агрессивных сред, находящихся в грунтовых водах.

По нашему мнению, данным критериям соответствуют шлакощелочные вяжущие (ШЩВ). На возможность использования измельченных доменных

шлаков с активизацией их шлакосодержащими веществами в качестве вяжущих веществ обратили внимание в СССР ещё в 60-е годы прошлого столетия. Бетоны и растворы на ШЩВ широко используются в европейских странах, но, к сожалению, в России в качестве самостоятельного вяжущего ШЩВ используется редко [10]. Причин тому, что ШЩВ практически не применяется в нашей стране несколько, они требуют подробного и аргументированного анализа, что не является предметом данной статьи.

**Результаты исследований.** Для подтверждения гипотезы о возможности применения ШЩВ для формирования твердеющей смеси при изготовлении буроинъекционных свай в Санкт-Петербургском ГАУ были выполнены теоретические и экспериментальные исследования [4] по определению оптимальных энергетических параметров ГИТа с целью получения устойчивого электрического пробоя межэлектродного промежутка в растворах шлакощелочных сред, что позволяет установить оптимальные энергетические параметры электрического разряда и зависимости данных параметров от состава шлакощелочной среды, в которой протекает пробой. Результаты исследований свидетельствуют что при постоянных параметрах индуктивности и сопротивления электродной цепи, с оптимальными значениями напряжения на электродах  $U = 4 \div 5$  кВ, ёмкость конденсатора  $C = 2000$  мкФ при величине межэлектродного зазора  $= 25 \div 30$  мм. Исследования проводились с использованием доменных шлаков Череповецкого металлургического завода и кальцинированной соды в качестве активатора. Материал свай должен обладать такими важными свойствами, как прочность, плотность и устойчивостью к воздействию агрессивных сред, содержащихся в грунтовых водах. Исследования образцов, приготовленных на портландцементе и ШЩВ, показывают лучшие показатели по прочности (прочность бетонных образцов с применением ШЩВ достигает 130 МПа), повышенную скорость набора прочности и

---



высокую плотность. С целью определения стойкости бетона с применением ШЩВ, образцы выдерживались в течение 120 суток в различных агрессивных средах. Качественные показатели коррозионной стойкости бетонных образцов, приготовленных на ШЩВ, приведены в табл.1.

Таблица 1  
Показатели коррозионной стойкости образцов на ШЩВ в агрессивных средах

| Вид вяжущего                       | Коэффициент коррозионной стойкости образцов из ШЩВ в разных средах в 120 суток |                            |                                    |                |
|------------------------------------|--|----------------------------|------------------------------------|----------------|
|                                    | Портландцемент   | 0,83                       | 0,79                               | 0,8            |
| Шлако-щелочной цемент              | 1,16   | 1,06                       | 1,05                               | 0,84           |
| Вид и состав агрессивного раствора | 5% раствор $\text{Na}_2\text{SO}_4$  | 1% раствор $\text{MgSO}_4$ | Насыщенный раствор $\text{MgSO}_4$ | 1% раствор HCL |

**Обсуждение.** Коррозионная стойкость образцов на ШЩВ объясняется повышенной плотностью затвердевшего состава. Испытания опытных и контрольных образцов на прочность позволили определить коэффициенты коррозионной стойкости ШЩВ на длительное воздействие агрессивных сред. Так прочность образцов, подверженных воздействию  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgSO}_4$  выше прочности контрольных образцов, что свидетельствует о долговечности материала. Данное обстоятельство является важной характеристикой материала буроинъекционных свай.

### Выводы.

1. При применении разрядно-импульсной технологии для устройства буроинъекционных свай с целью создания под подошвой фундамента зоны сцементированного и уплотнённого грунта целесообразно применять

следующие энергетические параметры ГИТ: напряжение на рабочем электроде (разрядник) не более 5кВ, электрическая ёмкость порядка 2000мФ конструкция применяемого разрядника предусматривает величину межэлектродного зазора, равную 25-30 мм. Это позволит увеличить время протекания электрического импульса и, следовательно, время действия ударной волны на грунт вокруг тела сваи.

2. В качестве твердеющего материала буроинъекционных свай целесообразно использовать смеси на шлако-щелочном вяжущем, что повысит его устойчивость к воздействию агрессивных сред, следовательно, и увеличит долговечность материала сваи.

### Литература

1. Сафарян В.С., Бай В.Ф., Еренчинов С.А. О методе экспериментального исследования напряжено-деформированного состояния грунтового основания // Инженерный вестник Дона, 2022, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7410](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7410)

2. Миклашевский Н.В., Чепелев В.В., Тордуа С.В., Лаптин Н.Е. Способ электрохимического укрепления грунта. Авторское свидетельство на изобретение № 692933. Опубликовано 25.10.1979. URL: [patents.su/2-692933-sposob-ehlektrokhimicheskogo-ukrepleniya-grunta.html](http://patents.su/2-692933-sposob-ehlektrokhimicheskogo-ukrepleniya-grunta.html)

3. Харченко А.И., Алексеев В.А., Харченко И.Я., Алексеев А.А. Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов // Вестник МГСУ, 2019. Т. 14, № 6(129). С. 680-689. DOI 10.22227/1997-0935.2019.6.680-689.

4. Кадушкин Ю.В., Миклашевский Н.В. Разрядник для создания бетонной стены в грунте. Патент на полезную модель № 215022 // Бюллетень № 33, опубликовано 24.11.2022. URL: [1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=215022&TypeFile=html](http://1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=215022&TypeFile=html)

5. Ellis I.W. Piling for underpinning: Symposium on Building Appraisal, Maintenance and Preservation. Bath: University of Bath, 1985. pp.88-96.

6. Yang T., Men Y., Rutherford C.J., Zhang Z. Static and Dynamic Response of Micropiles Used for Reinforcing Slopes // Appl.Sci.2021. Vol.11. No.14. DOI: 10.3390/app11146341.

7. Пронозин Я.А., Зазуля Ю.В., Самохвалов М.А. Способ изготовления бурой инъекционной сваи с контролируемым уширением. Патент на изобретение № 2522358 // Бюллетень № 19, опубликовано 10.07.2014. URL: [1.fips.ru/registersview/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2522358&TypeFile=html](http://1.fips.ru/registersview/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2522358&TypeFile=html)

8. Котляревская А.В., Вагурина Ю.А. История исследования и потенциал будущего применения бетонов на основе полимерных вяжущих // Инженерный вестник Дона, 2023, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8202](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8202)

9. Peretokina N.A., Doroganov V.A., Grudina V.A., Pogikyan A.N. Heat-Insulating Properties of Refractory Materials Made with the Use of Artificial Ceramic Binders // Refractories and Industrial Ceramics, 2016. Vol. 57, No. 2. pp. 189-191. DOI 10.1007/s11148-016-9952-3.

10. Абу Махади М.И., Безбородов А.В. Применение шлакощелочных вяжущих в строительстве // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования, 2017. Т. 18, № 2. С. 212-218.

### References

1. Safaryan V.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7410](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7410)

2. Miklashevsky N.V., Chepelev V.V., Tordua S.V., Laptin N.E. Sposob elektrokhimicheskogo ukrepleniya grunta [Method of electrochemical soil strengthening]. Patent No. 692933. 10.25.1979. URL: [patents.su/2-692933-sposob-ehlektrokhimicheskogo-ukrepleniya-grunta.html](http://patents.su/2-692933-sposob-ehlektrokhimicheskogo-ukrepleniya-grunta.html)



3. Kharchenko A.I., Alekseev V.A., Kharchenko I.Ya., Alekseev A.A. Vestnik MGSU, 2019. Vol. 14, No. 6(129). pp. 680-689. DOI 10.22227/1997-0935.2019.6.680-689.
4. Kadushkin Yu.V., Miklashevsky N.V. Razryadnik dlya sozdaniya betonnoj steni v grunte [Spark gap for creating a concrete wall in the ground]. Utility Model Patent No. 215022. Byulleten` № 33, opublikovano 24.11.2022. URL: [1.fips.ru/registersdocview/fips\\_servlet?DB=RUPM&DocNumber=215022&TypeFile=html](http://1.fips.ru/registersdocview/fips_servlet?DB=RUPM&DocNumber=215022&TypeFile=html)
5. Ellis I.W. Piling for underlining: Symposium on Building Appraisal, Maintenance and Preservation. Bath: University of Bath, 1985. pp.88-96.
6. Yang T., Men Y., Rutherford C.J., Zhang Z. Static and Dynamic Response of Micropiles Used for Reinforcing Slopes. Appl.Sci.2021. Vol.11. No.14. DOI: 10.3390/app11146341.
7. Pronozin Ya.A., Zazulya Yu.V., Samokhvalov M.A. Sposob izgotovlenija buroin'ekcionnoj svai s kontroliruemym ushireniem [Method of manufacturing a drilling-injection pile with controlled broadening]. Patent No. 2522358. Byulleten` № 19, opublikovano 10.07.2014. URL: [1.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2522358&TypeFile=html](http://1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2522358&TypeFile=html)
8. Kotlyarevskaya A.V., Vagurina Yu. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. No. 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8202](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8202)
9. Peretokina N. A., Doroganov V. A., Grudina V. A., Pogikyan A. N. Refractories and Industrial Ceramics, 2016. Vol. 57, No. 2. pp. 189-191. DOI 10.1007/s11148-016-9952-3.
10. Abu Mahadi M. I., Bezborodov A.V. Vestnik Rossiyskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya, 2017. Vol. 18, No. 2. pp. 212-218.

**Дата поступления: 17.12.2023**

**Дата публикации: 29.01.2024**

---