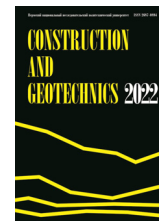




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 14, № 4, 2023

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.4.04

УДК 624.131:625.7:533.9

## ТЕРМООБРАБОТКА ГРУНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПЛАЗМЫ

**В.В. Сиротюк**

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),  
Омск, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 04 Апреля 2023

Одобрена: 20 Июля 2023

Принята к публикации:

10 ноября 2023

#### Ключевые слова:

грунт, поверхностная термическая обработка, плазматрон, наплавление слоев, термические напряжения.

### АННОТАЦИЯ

Представлено обобщение результатов экспериментально-теоретических исследований по интенсивному термическому воздействию на поверхность оснований из связных грунтов (в отличие от глубинной термообработки) с помощью электродугового генератора низкотемпературной плазмы (плазматрона). Для термообработки применен плазматрон с массивными расходуемыми электродами из боросилицированного графита и широким «размытым» плазменным факелом. Выполнено физическое и математическое моделирование термического воздействия на поверхность из глинистого грунта движущимся высокотемпературным источником. Впервые изготовлена специальная установка и выполнены экспериментальные исследования по термообработке грунтовых поверхностей на площадке электродуговым плазматроном. Установлено, что эффективная плотность теплового потока достигает 2,5–3,5 кВт/см<sup>2</sup>. Основная часть тепловой энергии для используемого плазматрона поступает в материал за счет лучистой теплопередачи. Аналитическая математическая модель температурного поля трехмерного полуограниченного тела в рассматриваемом технологическом процессе задается существенно нелинейной краевой задачей для нелинейного уравнения теплопроводности с нелинейными граничными условиями второго рода. При решении теплофизических задач грунтовое полуограниченное пространство рассматривалось как квазигомогенная среда, имеющая постоянную начальную температуру и исходные теплофизические параметры, изменяющиеся в процессе повышения температуры. Эффективные значения теплофизических характеристик определяли на основе экспериментальных данных. Расчеты и эксперименты показали, что граница температуры, приводящей к существенным изменениям строительных свойств грунтов, опускается до глубины 4–6 см от поверхности, несмотря на кипение грунтового расплава с температурой 2500–2800 К на грунтовой поверхности. Поэтому предложен новый технологический принцип термообработки, заключающийся в наращивании грунтового расплава слоями по 4–5 см вверх от исходной поверхности. Установлена невозможность получения положительного эффекта даже при использовании мощного высокотемпературного источника воздействия в случае применения традиционной технологии поверхностной термообработки. Новая плазменная технология поверхностной термообработки грунтовых поверхностей до стадии силикатного расплава позволяет получать общий слой требуемой толщины. При этом значительно повышена эффективность поверхностной термообработки. Новая технология послойного наплавления уменьшает трещинообразование в слое при остывании расплава, однако не устраняет этот негативный процесс (в отличие от глубинной термообработки по предлагаемой технологии).

**Сиротюк Виктор Владимирович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: [sirvv@yandex.ru](mailto:sirvv@yandex.ru).

**Viktor V. Sirotyuk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [sirvv@yandex.ru](mailto:sirvv@yandex.ru).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## HEAT TREATMENT OF GROUND SURFACE USING AN ELECTRIC ARC PLASMA GENERATOR

V.V. Sirotiyuk

Siberian State Automobile and Road University (SibADI), Omsk, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 04 April 2023  
Approved: 20 July 2023  
Accepted for publication:  
10 November 2023

#### Keywords:

soil, surface heat treatment, plasma torch, layer deposition, thermal stresses.

### ABSTRACT

The article presents a generalization of the results of experimental and theoretical studies on the intensive thermal effect on the surface of foundations from cohesive soils (as opposed to deep heat treatment) using an electric arc generator of low-temperature plasma (plasmatron). A plasmatron with massive consumable electrodes made of borosilicated graphite and a wide "blurred" plasma torch was used for heat treatment. Physical and mathematical modeling of the thermal effect on the surface of clay soil by a moving high-temperature source has been performed. For the first time, a special installation was manufactured and experimental studies were carried out on the heat treatment of ground surfaces on the site with an electric arc plasma torch. It is established that the effective heat flux density reaches 2.5–3.5 kW/cm<sup>2</sup>. The main part of the thermal energy for the used plasmatron enters the material due to radiant heat transfer. An analytical mathematical model of the temperature field of a three-dimensional semi-bounded body in the technological process under consideration is given by an essentially nonlinear boundary value problem for a nonlinear heat equation with nonlinear boundary conditions of the second kind. When solving thermophysical problems, the ground semi-bounded space was considered as a quasi-homogeneous medium having a constant initial temperature and initial thermophysical parameters that change in the process of temperature increase. The effective values of the thermophysical characteristics were determined on the basis of experimental data. Calculations and experiments have shown that the temperature boundary leading to significant changes in the structural properties of soils drops to a depth of 4–6 cm from the surface, despite the boiling of the ground melt with a temperature of 2500 ...2800 K on the ground surface. Therefore, a new technological principle of heat treatment is proposed, which consists in building up the ground melt in layers of 4–5 cm up from the initial surface. The impossibility of obtaining a positive effect even with the use of a powerful high-temperature source of exposure in the case of traditional surface heat treatment technology has been confirmed. The new plasma technology of surface heat treatment of ground surfaces to the stage of silicate melt allows to obtain a common layer of the required thickness. At the same time, the efficiency of surface heat treatment is significantly increased. The new technology of layer-by-layer surface deposition reduces cracking in the layer when the melt cools, but does not eliminate this negative process.

---

## Введение

Термическое воздействие является одним из старейших физических методов улучшения строительных свойств грунтов. Оно основано на воздействии положительного температурного поля, вызывающего необратимые коренные изменения состава, структуры и физико-механических свойств грунтов.

За прошедшие годы разработано множество способов термического укрепления грунтов, но подавляющее большинство из них осталось на уровне изобретений или в рамках экспериментального строительства оснований зданий и сооружений [1–7].

Изучение и анализ исторических аспектов термического укрепления грунтов позволил нам систематизировать полученную информацию и выделить три основных этапа развития рассматриваемой проблемы. В основу предлагаемой систематизации положены технологические факторы, определяющие возможность достижения результатов – плотность теплового потока и температуру источника тепловой энергии.

Наиболее продолжительным был первый этап исторического развития. В качестве источника тепловой энергии использовали твердые углеводородные топлива (уголь, древесину). Плотность теплового потока не превышала 50 Вт/м<sup>2</sup>, а температура не превышала 2000 К. При этом получали произвольные куски спекшейся породы или штучные керамические изделия (кирпич, клинкер).

Переход ко второму этапу развития термического упрочнения грунтов происходил в период 20–30-х гг. XX в. В качестве источника тепловой энергии использовали жидкие и газообразные углеводородные топлива (газ, нефтепродукты). Плотность теплового потока увеличилась до  $50 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>, а температура до 3000 К.

Успешному развитию технической мелиорации способствовало учение К.К. Гедройца, работы П.А. Земятченского, С.С. Морозова, В.М. Безрука и их учеников. В 1928 г. вышла одна из первых специальных работ по термообработке грунтов [8]. Исследования по вопросам прогрева грунтов проводились в лабораториях Российского дорожного научно-исследовательского института (ДорНИИ) [9]. В результате этих исследований были предложены способы и устройства, позволяющие проводить термическое укрепление грунтов на поверхности и в массиве.

Одна из первых машин (1931 г.) [5] представляла собой печь, передвигающуюся по земляному полотну и обжигавшую его газогенераторным газом (рис. 1).

Первая российская обжигательная машина (1934 г.) [6] состояла из шести звеньев общей протяженностью около 20 м и передвигалась по рельсам со скоростью от 10 до 40 м/сут (рис. 2). Обжиг производился форсунками, подававшими нефть в топочную камеру.

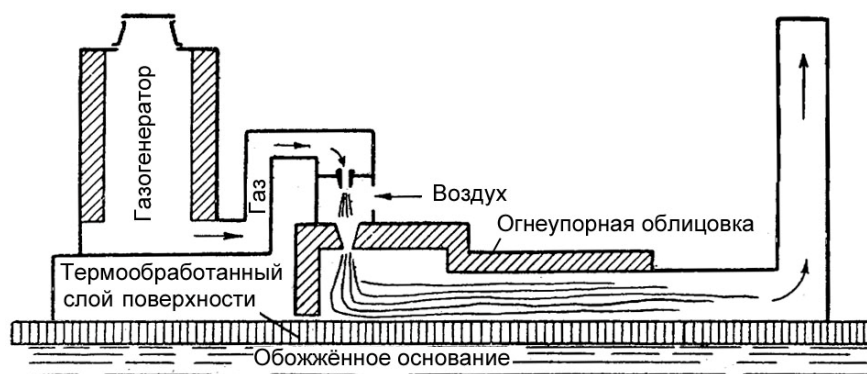


Рис. 1. Газогенераторная машина Ирвина  
Fig. 1. Irwin's gas generator machine

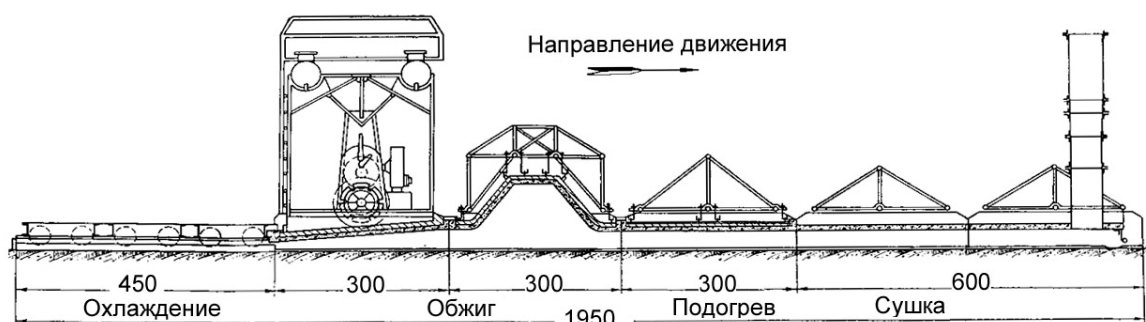


Рис. 2. Первая российская обжигательная машина  
Fig. 2. The first Russian roasting machine

Несмотря на ряд конструктивных отличий, эти устройства объединяли общие признаки: машины медленно перемещались по поверхности дороги, обжигая грунт топливными горелками, расположенными под теплоизолирующим кожухом. Термообработка грунта велась при температуре примерно 1200 К до спекания вглубь от дневной поверхности на толщину 3–5 см.

Конец 50-х гг. является началом третьего этапа развития рассматриваемой проблемы. Для термообработки грунтов стали применять электронагревательное оборудование.

На протяжении третьего этапа температура нагрева грунта увеличилась до  $10^5$  К, а плотность теплового потока – более  $50 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. В 1959 г. вышла в свет монография по высокочастотному нагреву материалов [10]. С 1980 г. в Московском государственном университете по инициативе Е.М. Сергеева и Л.В. Гончаровой начались и сейчас ведутся исследования по СВЧ-нагреву грунтов [11, 12].

Исследования по плазменным технологиям в строительстве выполняли в Тольяттинском высшем военном строительном командном училище (ТВВСКУ) [13] в содружестве с учеными Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТФ СО РАН). Крупные исследования по плазменным строительным технологиям велись в Томском государственном архитектурно-строительном университете (ТГАСУ) [14].

Электротермические устройства обладают рядом преимуществ по сравнению с установками с топливными горелками: возможностью концентрации большой мощности в малом объеме; получением более высоких температур; легкостью регулирования температурного режима; возможностью герметизации рабочего пространства; удобством механизации и автоматизации работы установок; улучшением условий труда; компактностью оборудования.

Практическому использованию поверхностного термического укрепления грунтовых оснований, прежде всего, препятствует малая теплопроводность и большая теплоемкость грунтов. Недостаточно изучены сложные физико-химические процессы, сопровождающие термическое воздействие на грунт, особенности структурообразования и формирования физико-механических свойств термогрунта. Дополнительные трудности создает многообразие видов грунтов, представляющих полиминеральные конгломераты с изменяющимся химико-минералогическим составом и свойствами.

## **Цель, задачи исследования**

Целью настоящего экспериментально-теоретического исследования, является определение возможности и целесообразности применения мощного высокотемпературного источника термического воздействия для упрочнения грунтовых поверхностей.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выбран источник термического воздействия;
- осуществлено математическое моделирование теплового воздействия;
- изготовлены стенды и оборудование для экспериментальных исследований;
- выполнен цикл экспериментальных исследований на стенде и площадке;
- дана оценка возможности и целесообразности применения плазматрона для термической модификации грунтовых поверхностей.

## **Результаты и их анализ**

### **Выбор источника термического воздействия (плазматрона)**

Генераторы низкотемпературной плазмы (плазмотроны) являются наиболее мощными, универсальными и эффективными орудиями термического воздействия на строительные материалы. От правильного выбора вида и конструкции генератора плазмы зависит не только эффективность технологического процесса, но и возможность достижения поставленной цели.

В соответствии с поставленной целью, учитывая специфику работы на открытой строительной площадке, к используемым при этом генераторам низкотемпературной плазмы мы предъявляли следующие требования:

- температура плазмы должна составлять не менее  $5 \cdot 10^3$  К, а плотность теплового потока – не менее  $20 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>;
- параметры плазмы должны быть управляемыми; мощность генератора должна быть не менее 100 кВт;
- генерация плазмы должна обеспечиваться в течение нескольких часов (7–24 ч);
- нужна простая и надежная конструкция с высоким ресурсом работы электродов либо с дешевыми и легкоъемными электродами;
- плазмотрон должен допускать применение воздуха в качестве плазмообразующего газа;
- нужен генератор с широким плазменным факелом (20–40 см);
- КПД преобразования первичной энергии в тепловую энергию плазмы должен быть не ниже 80 %;
- нужен генератор, работающий при относительно низком рабочем напряжении и частоте тока; количество и протяженность кабелей и шлангов, подходящих к плазмотрону, должны быть минимальными.

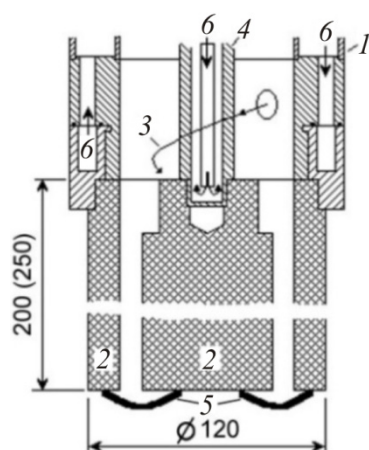


Рис. 3. Коаксиальный многодуговой плазмотрон (показан электродный узел): 1 – наружная державка; 2 – анод и катод; 3 – подача газа; 4 – внутренняя державка; 5 – плазменно-дуговой разряд; 6 – система водоохлаждения  
Fig. 3. Coaxial multi-arc plasma torch (the electrode assembly is shown): 1 – external holder; 2 – anode and cathode; 3 – gas supply; 4 – internal holder; 5 – plasma arc discharge; 6 – water cooling system

плазмы ( $< 20$  м/с) при значительном объеме разогреваемого газа (до  $10$  м<sup>3</sup>/ч). Величина звукового давления не превышает 80 дБ. Энергетическое питание производится от серийного источника (сварочного трансформатора, выпрямителя) мощностью более 80 кВт и напряжением холостого хода более 130 В.

Рассмотрев десятки генераторов плазмы, мы остановили выбор на оригинальном плазматроне конструкции В.Н. Пашацкого [15] (рис. 3).

Этот генератор имеет коаксиальную схему с поперечно обдуваемыми открытыми дуговыми разрядами. Может работать на постоянном или переменном токе силой до 1800 А при малом (безопасном) рабочем напряжении от 60 до 110 В. Плазменный генератор прост в конструктивном исполнении, не содержит деталей, изготовленных из дорогостоящих металлов и сплавов.

Два массивных расходуемых электрода выполнены из боросилицированного графита. Широкий плазменный факел образуется за счет взаимодействия многодугового разряда с плазмообразующим газом (воздухом), подаваемым с тангенсальной закруткой. Особенностью этого плазмотрона является сравнительно малая скорость истечения

## Математическое моделирование теплового воздействия

На первом этапе оценивалась плотность тепловых потоков. Общая величина радиационного теплового потока  $S_r$  складывается из нескольких составляющих [15]:

$$S_r = S_{r1} + S_{r2} + S_{r3}, \quad (1)$$

где  $S_{r1}$  – тепловой поток от раскаленных электродов;  $S_{r2}$  – от открытого многодугового разряда;  $S_{r3}$  – от запыленного факела.

Расчеты показали, что эффективная плотность теплового потока для этого плазматрона изменяется в пределах от 2,5 до 3,5 кВт/см<sup>2</sup>. При этом основная часть тепловой энергии поступает в материал за счет лучистой теплопередачи. Конвективная составляющая, обычно рассматриваемая как источник нагрева типа  $I_t$  с граничными условиями III рода, может быть учтена посредством принципа эквивалентности. Это позволяет моделировать процесс теплопередачи при нагреве поверхности данным плазматроном как источником типа  $I_s$  с граничными условиями II рода [16].

В теплофизической постановке рассматриваемый технологический процесс выглядит следующим образом. Температурное поле в любой точке технологического слоя грунтового полугораниченного тела ( $x \geq 0$ ) формируется под влиянием положительного внешнего технического теплового источника  $q_t$  (плазматрона) и отрицательного естественного теплового потока  $q_n$ , охлаждающего нагретую поверхность  $x = 0$  по закону Ньютона (рис. 4).

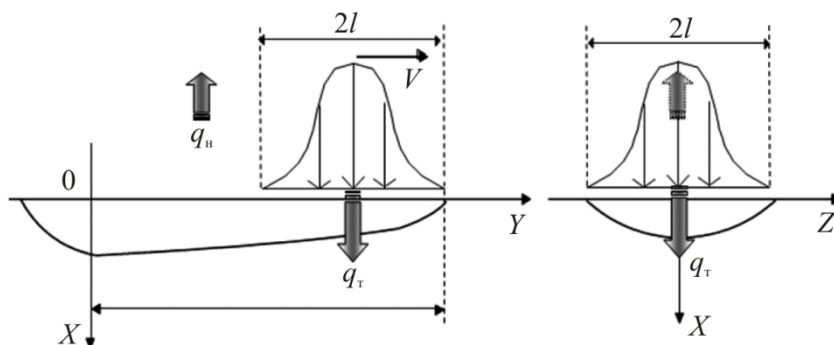


Рис. 4. Схема взаимодействия теплового источника с полугораниченным телом  
Fig. 4. Diagram of the interaction of a heat source with a semi-bounded body

Технический тепловой источник  $q_t$  характеризуется следующими особенностями: вектор теплового потока, порожденный внешним техническим тепловым источником, перпендикулярен нагреваемой поверхности  $x = 0$ ; движение источника осуществляется параллельно поверхности  $x = 0$  с постоянной скоростью  $v = \text{const}$ .

При решении теплофизических задач грунтовое полугораниченное пространство рассматривалось как квазигомогенная среда, имеющая постоянную начальную температуру  $T_0$  и исходные теплофизические параметры  $\lambda_0$ ,  $c_0$ ,  $\gamma_0$ ,  $a_0$ , изменяющиеся в процессе повышения температуры.

Эффективные значения теплофизических характеристик определяли на основе экспериментальных данных, полученных нами на стенде.

В общем случае математическая модель температурного поля  $T(x, y, z, t; \vec{\sigma})$  трехмерного полугораниченного тела ( $x \geq 0$ ) в рассматриваемом технологическом процессе задает-

ся существенно нелинейной краевой задачей для нелинейного уравнения теплопроводности с нелинейными граничными условиями второго рода [16, 17]:

$$(c\gamma T)'_i = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + F, \quad (2)$$

$$T(x, y, z, 0) = \varphi(x, y, z), \quad (3)$$

$$-\lambda T'_x(+0, y, z, t) = q(y, z, t; T), \quad (4)$$

$$T(+\infty, y, z, t) = T(x, \pm\infty, z, t) = T(x, y, \pm\infty, t) = T_0, \quad (5)$$

$$T'_x(+\infty, y, z, t) = T'_y(x, \pm\infty, z, t) = T'_z(x, y, \pm\infty, t) = 0, \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda(T), c = c(T), \gamma = \gamma(T), \text{ при } T_1 \leq T \leq T_2. \quad (7)$$

Алгоритм решения этой задачи преобразован нами в компьютерную программу ЭВМ TEMPER-2D [18, 19].

Результаты расчетов позволили проследить и прогнозировать ход изменения температуры грунтов в зависимости от времени, глубины расположения слоя, интенсивности внешнего теплового потока на поверхности, от продолжительности воздействия этого потока на поверхность. На рис. 5 представлено одно из численных решений, выполненных по разработанной программе.

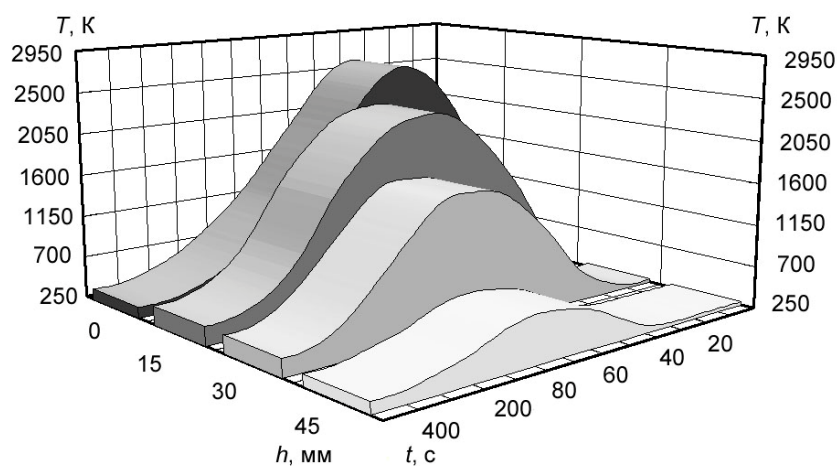


Рис. 5. Распределение температуры ( $T$ , К) по глубине ( $h$ , мм) за время ( $t$ , с) при скорости перемещения теплового источника 240 мм/мин и плотности теплового потока  $20 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>

Fig. 5. Temperature distribution ( $T$ , K) by depth ( $h$ , mm) over time ( $t$ , s) at a heat source displacement rate of 240 mm/min and a heat flux density of  $20 \cdot 10^5$  W/m<sup>2</sup>

### Стендовые экспериментальные исследования

Для лабораторных исследований изготовлен специальный стенд с вышеописанным генератором плазмы, смонтированным на движущемся портале шириной 4 м, с электроприводом и пультом управления (рис. 6).

Для экспериментальных исследований использовались разные грунты (от песка до тяжелого суглинка) с разной степенью уплотнения. Температуру на поверхности расплава

замеряли яркостным пирометром ОППИР-017Э, а на различной глубине – вольфрам-иридиевыми термопарами, помещенными в защитные чехлы из двуоксида циркония. На рис. 7 представлен один из результатов измерения температуры грунта.

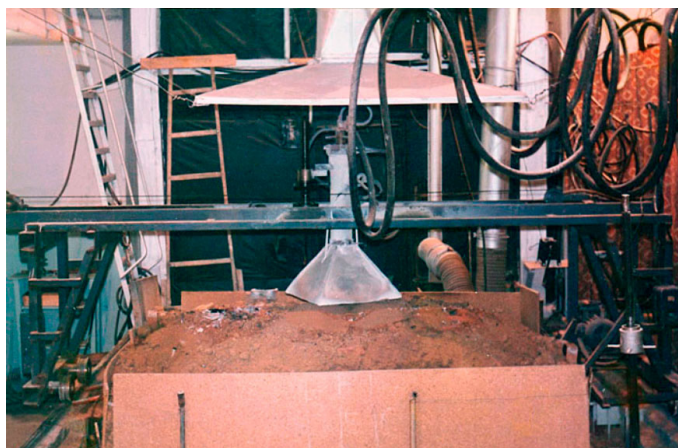


Рис. 6. Стенд для плазменной термообработки грунтов  
Fig. 6. Stand for plasma heat treatment of soils

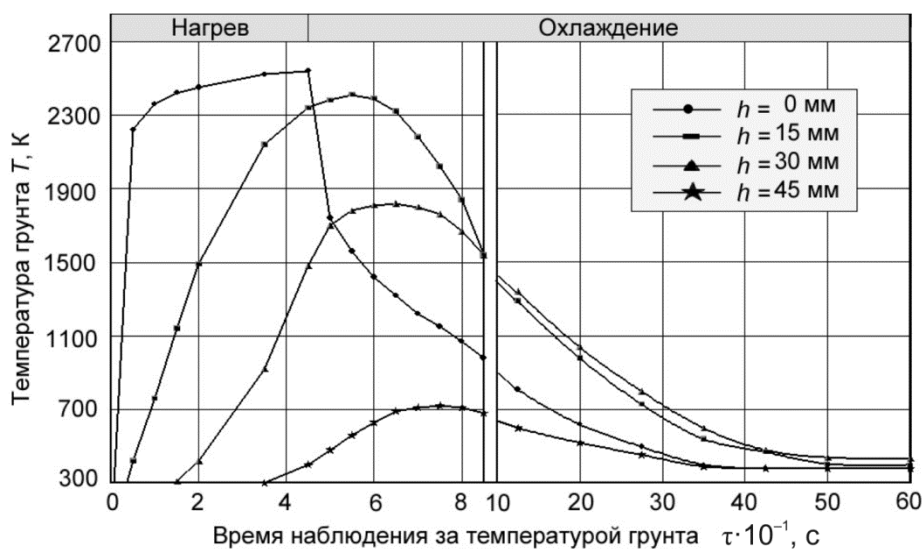


Рис. 7. Температура на различной глубине  $h$  в процессе плазменного нагрева и остывания грунтовой поверхности  
Fig. 7. Temperature at different depths  $h$  during plasma heating and cooling of the ground surface

Результаты этих измерений использованы для назначения эффективных значений теплофизических характеристик, используемых для математического моделирования. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных подтверждает адекватность принятой математической модели для прогнозирования кинетики температурного поля.

Наши исследования процессов структурообразования различных грунтов (от песка до суглинка тяжелого) при плазменном нагреве [20] показали, что значимое и необратимое изменение физико-механических свойств с упрочнением разных термогрунтов начинаются с границы температуры 900–1200 К. Расчеты и эксперименты при традиционной термообработке грунтовых поверхностей показали, что эта граница температур находится на глу-



бине 4–6 см от поверхности, несмотря на кипение и испарение расплава с температурой 2500–2800 К на грунтовой поверхности.

С целью повышения эффективности теплового воздействия была предпринята попытка увеличить удельную поверхность теплопередачи за счет модификации ровной поверхности грунта (рис. 8).

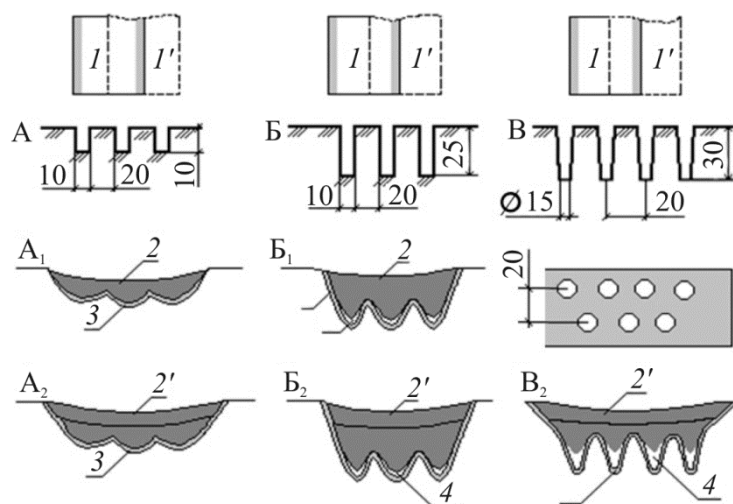


Рис. 8. Термообработка модифицированной поверхности: А, Б – гребенка мелкая и глубокая; В – шпур; 1, 1' – электроды плазматрона; 2, 2' – первый и второй слой плавного грунта; 3 – видоизмененный грунт; 4 – полости, не заполненные расплавом  
 Fig. 8. Heat treatment of the modified surface: А, Б – a shallow and deep comb; В – holes; 1, 1' – plasma torch electrodes; 2, 2' – the first and second layers of fused soil; 3 – vi-modified soil; 4 – cavities not filled with melt

После термообработки при обследовании модифицированных площадок обнаружено, что некоторые полости заполнены плотным стекловидным материалом толщиной 25–35 мм. Над гребнями сформировалось покрытие толщиной 7–8 мм. Нижняя часть полостей не всегда заполнена расплавом грунта.

Установлено [20], что даже при самой высокой температуре (2800 К) силикатной массы грунтового расплава величина вязкости этой массы не опускается менее 40–50 Па·с. Это объясняет бесперспективность попыток дальнейшего снижения вязкости грунтовых расплавов только за счет увеличения их температуры. По расчетам интенсивность образования расплава на модифицированных площадках составила 230–250 см<sup>3</sup>/мин, что выше аналогичных показателей при термообработке ровных плотных площадок. Однако это не позволило существенно изменить неутешительный результат поверхностной плазменной термообработки грунтов.

Численное моделирование технологического процесса подтвердило бесперспективность дальнейшего увеличения температуры источника нагрева и плотности теплового потока при обработке плотных грунтовых поверхностей.

Таким образом, несмотря на увеличение температуры источника в 3–4 раза, а плотности теплового потока на два порядка, результаты поверхностной термообработки грунтов существенно отличаются от достижений, полученных ранее при использовании топливных горелок. Основной причиной неудовлетворительных результатов при использовании традиционной технологии термообработки грунтовых поверхностей является малая теплопровод-

ность, большая теплоемкость влажных грунтов и значительные потери тепловой энергии, которые увеличиваются при повышении температуры термогрунта, достигая 80 %.

### Экспериментальные исследования на площадке

Выход из вышеописанной тупиковой ситуации был найден нами в ином технологическом подходе к поверхностной термообработке грунтов. Запроектирована и изготовлена экспериментальная установка для поверхностной термообработки грунта в виде металлической рамы с плазматроном и шкафом приборного управления, передвигающейся на четырех колесах (рис. 9).



Рис. 9. Экспериментальная установка  
для поверхностной термообработки грунтов на площадке  
Fig. 9. Experimental installation for surface heat treatment of soils on the site

Привод на два ведущих колеса установки осуществлялся от электродвигателя через понижающий редуктор. На раме установлен подвижный манипулятор, на котором закреплен плазматрон, перемещающийся посредством червячного привода от электродвигателя через клиноременную передачу и понижающий редуктор. Рабочий ход манипулятора составлял 1500 мм. Расстояние между электродами и обрабатываемой поверхностью изменяли за счет специальной подвески плазматрона. Электродный узел генератора плазмы закрыли свето- и теплозащитным экраном. Подачу грунта на расплав осуществляли с помощью двух дозаторов (на фото не показаны), закрепленных с обеих сторон от плазматрона на манипуляторе. Рыхлый грунт подавали через точки дозаторов вслед за движением плазматрона вправо или влево. Плазматрон перемещался вправо (или влево) с установленной скоростью, оставляя полосу шириной 12–14 см слоя грунтового расплава. Грунт подавался из дозатора прямо на расплав, имеющий температуру 2400–2600 К, толщиной 30–40 мм. Рыхлый слой прогревался до температуры 600–700 К, замедляя остывание расплава. Подобными челночными проходами наплавлялся слой термогрунта требуемой толщины. Затем установка перемещалась вперед на 10–12 см и процесс повторялся.

Преимущества нового способа плазменной термообработки заключаются в получении требуемого слоя термогрунта значительной толщины, но не вниз (как ранее), а вверх. КПД термического воздействия повысился с 20 до 38 %. Удельная энергоемкость процесса уменьшалась до 4–5 Вт·ч/см<sup>3</sup> термогрунта.

К негативному результату следует отнести трещинообразование в слоях термогрунта.

Термогрунт обладает рядом специфических свойств: высокий предел прочности при сжатии (до 200 МПа), на растяжение при изгибе (до 14 МПа), морозостойкость (> 300 циклов). Основным недостатком термогрунта является склонность к трещинообразованию, которая затрудняет создание сплошных слоев укрепленных оснований (это явление было отмечено и при первых экспериментах с газогенераторными установками (см. рис. 1 и 2).

Основная причина появления трещин в слоях термогрунта кроется в больших термических напряжениях, возникающих при быстром остывании грунтового расплава. При остывании силикатный расплав проходит три стадии: жидкотекучее, вязкое и хрупкое (твердое) состояние. При этом температура снижается на два порядка, а величина условной вязкости возрастает по мере остывания на 12–14 порядков [21].

В грунтах, прошедших стадию расплава, остаются внутренние напряжения первого и второго рода [22]. Напряжения первого рода – это упругие макроскопические напряжения как положительные, так и отрицательные. Разновидностью этих напряжений являются термические напряжения, которые могут разрушить сплошность слоев термогрунта при его остывании. Напряжения второго рода (упругие микроскопические) меняют свой знак и величину в областях, соизмеримых с размерами микронеоднородностей в материалах.

Среди различных остаточных напряжений, возникающих в термогрунтах, наибольшее практическое значение имеют макроскопические напряжения, связанные с неравномерными пластическими деформациями, возникающими под действием релаксирующих термоупругих напряжений (термопластических напряжений), а также напряжения, связанные с различной «тепловой историей» разных участков плавленого грунта (термоструктурные напряжения).

Величина напряжений в каждой точке слоя зависит от разницы между температурой в этой точке и средней температурой  $T_{cp}$  слоя [22, 23]. С учетом препятствия свободному сжатию напряжения в тонком слое пластины с температурой  $T$  будут равны:

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{E\alpha}{1-\mu^2} (T_{cp} - T), \quad (8)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\alpha$  – относительная скорость релаксации,  $cm^{-1}$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Из-за возникновения градиента температур при разной скорости остывания пластины распределение температур по толщине будет параболическим. Температура на поверхности  $t_{п}$  всегда будет ниже, чем средняя  $t_{cp}$ , поэтому на поверхности возникают растягивающие напряжения. При дальнейшем остывании пластины, когда наружные слои потеряли способность к пластическим деформациям, а центральная часть, охлаждаясь, сжимается, поверхность тела будет испытывать сжимающие напряжения, а центральная – растягивающие.

Поскольку плавленые грунты имеют прочность на растяжение значительно меньше, чем при сжатии (в 14–17 раз), то при охлаждении разрушение начинается с поверхности. Максимальные напряжения на поверхности пластины  $\sigma_{пов}^{пл}$  при скорости охлаждения  $\tau$  и температуропроводности  $a$ , можно определить по формуле

$$\sigma_{пов}^{пл} = \frac{E\alpha}{1-\mu} \frac{\tau r_n^2}{3a}. \quad (9)$$

Предельная разность температур, которую может выдержать образец при быстром охлаждении, составляет

$$\Delta T = \frac{R_{\text{раст}}(1-\mu)}{E\alpha} S = K_m S, \quad (10)$$

где  $R_{\text{раст}}$  – предел прочности при растяжении;  $S$  – фактор, зависящий от формы образца;  $K_t = R_{\text{раст}}(1-\mu) / E$ ;  $\alpha$  – постоянная, зависящая от свойств материала (коэффициент термостойкости).

Расчеты по вышеприведенным формулам показывают, что поверхность пластины (поверхностный способ термообработки) при быстром охлаждении подвергается значительным термическим напряжениям, превышающим предел прочности при растяжении плавленного грунта. Эксперименты подтверждают расчетные данные: на поверхности плавленного грунта, остывающего без утеплителя, образуются магистральные трещины с шагом 0,2–0,5 м и сетка более мелких трещин (рис. 10, увеличение  $\times 185$ ).

Трещиностойкость плавленного грунта может быть повышена за счет ряда мероприятий: увеличения предела прочности при растяжении или снижения модуля упругости материала; уменьшения коэффициента термического расширения; уменьшения толщины наплаваемых слоев; снижения скорости остывания поверхности расплава.

Первые три мероприятия реализуются корректировкой состава термообрабатываемого грунта, два последних – изменением технологических параметров и применением защитных тепловых экранов.

Описанная выше технология послойного наплавления до некоторой степени уменьшает трещинообразование за счет формирования слоев с теплоизоляцией остывающей поверхности расплава. Однако полностью устранить негативный процесс трещинообразования слоев термогрунта при производстве работ на строительной площадке не удалось.

Плазменная технология послойного наплавления реализована и при глубинной термообработке грунтов [24] с помощью погружного плазматрона длиной 4 м и специального дозатора грунта, устанавливаемого на устье скважины. При этом медленное остывание расплава, заполняющего скважину в массиве, с постепенной передачей тепла окружающему грунту предотвращает трещинообразование в сваях.

Полученные результаты по трещиностойкости плавленных грунтов и способах ее улучшения подтверждаются исследованиями каменного литья, выполненными в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) под руководством И.М. Игнатовой [25]. Получение штучных изделий из плавленных минералов при контролируемом составе и скорости остывания значительно улучшает их качество [26, 27] и позволяет обсуждать возможности применения этой технологии даже при освоении Луны [28].

## Выводы

1. Изучение и анализ исторических аспектов становления теории и практики термического укрепления грунтов позволил систематизировать полученную информацию и выделить три основных этапа развития рассматриваемой проблемы. В основу предлагаемой

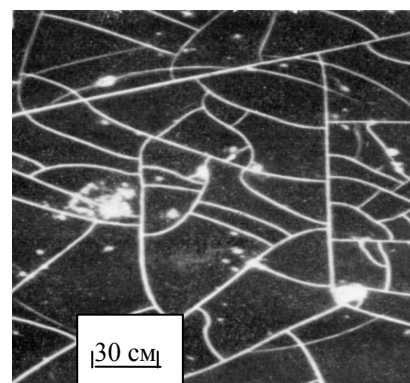


Рис. 10. Сетка трещин на поверхности плавленного грунта  
Fig. 10. A grid of cracks on the surface of the fused soil

систематизации положены технологические факторы – плотность теплового потока и температура источника тепловой энергии.

2. На протяжении прошлого века предпринимались неоднократные попытки практической реализации многочисленных изобретений способов и устройств для поверхностной термообработки грунтов в условиях строительной площадки. Переход на электротермические устройства (плазмотроны, СВЧ-излучатели, лазеры) вместо топливных горелок позволил концентрировать большую мощность технологических устройств в малом объеме. Однако достичь значительных позитивных результатов пока не удалось.

3. Математическое и физическое моделирование термического воздействия на грунтовую поверхность движущимся высокотемпературным источником (генератором плазмы) подтвердило невозможность получения положительного эффекта при использовании традиционной технологии.

Причиной неудовлетворительных результатов при использовании традиционной технологии термообработки грунтовых поверхностей является малая теплопроводность, большая теплоемкость влажных грунтов и значительные потери тепловой энергии, которые увеличиваются при повышении температуры термогрунта, достигая 80 %.

4. Предложена новая плазменная технология поверхностной термообработки грунтовых поверхностей до стадии силикатного расплава, заключающаяся в получении требуемого слоя термогрунта посредством постепенного наплавления слоев по 4–5 см сверху, с подачей рыхлых слоев грунта на остывающий ниже расплав. При этом КПД термического воздействия повысился до 38 %. Удельная энергоемкость процесса уменьшалась до 4–5 Вт·ч/см<sup>3</sup> термогрунта.

5. Основным недостатком плавящихся грунтов является склонность к трещинообразованию при остывании, которая затрудняет создание сплошных слоев при поверхностном укреплении грунтов. Основная причина появления трещин в слоях кроется в больших термических напряжениях, возникающих при быстром остывании грунтовых расплавов в слое.

Медленное остывание расплава в скважине в грунтовом массиве или в штучных изделиях позволяет релаксировать температурные напряжения.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад 100 %.**

## **Библиографический список**

1. Кондрашин К.Г., Пилипенко В.Н., Голубничева Е.М. Возможность термического укрепления грунтов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 2 (36). – С. 20–25.
2. Юрданов А.П. Термическое упрочнение грунтов в строительстве. – М.: Стройиздат, 1990. – 128 с.
3. Смирнов В.А., Работа Э.Н., Гончаров Е.В. Термоукрепление слабосвязных грунтов и пород при ведении горных работ // Записки Горного института. – 2011. – Т. 190. – С. 37–41.
4. Ibragimov E. Forecasting stress-strain behavior of a thermally-stabilized base // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2019. – № 55(6). – P. 433–437.
5. Ibragimov E. Experience using heat pumps as soil heat stabilization systems in a cryolithological zona // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2015. – № 52(5). – P. 273–276.

6. Никитин В.П. Способы термической обработки грунтов для дорожного строительства. – М.: Информавтодор, 1993. – 40 с.
7. Игошева Л.А., Гришина А.С. Обзор основных методов укрепления грунтов основания // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 5–21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01
8. Филатов М.М. Улучшение глинистых грунтовых дорог. – М.: Транспечать НКПС, 1928. – 114 с.
9. Безрук В.М. Стабилизация несущей способности грунтов прогревом // Стабилизация грунтов: сб. ст. ДорНИИ. – М.: Изд-во Гушосдор, 1938. – С. 34–60.
10. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А.А. Нетушил, В.Я. Ковицкий, В.Н. Кудрин [и др.]. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 480 с.
11. Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1973. – 376 с.
12. Новая технология устройства оснований и фундаментов с термическим укреплением грунта СВЧ полем / Ю.И. Спектор, О.Л. Денисов, А.Е. Щепетов, С.В. Топоров // Европейская ассоциация геологов и инженеров: материалы конференции, 6-я встреча EAGE/EEGS, сентябрь 2000 г. – С. 51–56. DOI: 10.3997/2214-4609.201406315
13. Задворнев Г.А., Зарубин Б.М. Плазменно-ударная технология получения оснований повышенной несущей способности // Известия СО АН СССР. Серия технических наук. – Новосибирск: Наука, 1988. – № 21. – С. 54–59.
14. Ефименко В.Н., Чарыков Ю.М. Перспективы развития электротермической геотехнологии преобразования грунтов в дорожном // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 197–207.
15. Пашацкий Н.В., Кравченко И.Т. Тепловые потоки в факеле плазмотрона с горячими электродами // ИФЖ. – 1985. – Т. 48, № 2. – С. 338–339.
16. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
17. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1976. – 528 с.
18. Математическое моделирование термического воздействия низкотемпературной плазмы на обрабатываемую поверхность / С.И. Барайщук, В.Л. Егоров, В.В. Сиротюк, В.И. Струнин // Актуальные вопросы строительства и эксплуатации автомобильных дорог: сб. науч. тр. СибАДИ. – Омск: ОмПИ, 1992. – С. 60–63.
19. Использование эффективных теплофизических характеристик при решении нелинейных краевых задач / А.Н. Шестаков, В.В. Сиротюк, С.И. Барайщук, В.Л. Егоров // Тез. докл. на междунар. конф. «Современные проблемы транспортного строительства, автомобилизации и высокоинтеллектуальные научно-педагогические технологии». – Омск: Изд-во СибАДИ, 2000. – С. 16–19.
20. Сиротюк В.В., Погребинский Г.М. Процессы структурообразования при плазменной термообработке грунтов до стадии силикатного расплава // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 1. – С. 33–36.
21. Бартенев Г.М. Строение и механические свойства неорганических стекол. – М.: Стройиздат, 1966. – 216 с.
22. Бартенев Г.М. Механические свойства и тепловая обработка. – М.: Госстройиздат, 1960. – 164 с.
23. Кингери У.Д. Введение в керамику. – М.: Стройиздат, 1967. – 499 с.

24. Sirotyuk V.V., Arkhipov V.A. Installation procedure for in-situ melted-soil piles using a low-temperature plasma generator // *Soil Mech Found Eng.* – 1999. – No. 36. – P. 217–222. DOI: /10.1007/BF02471287

25. Игнатова А.М. Механизм деформации, растрескивания и разрушения структурных составляющих синтетических минеральных сплавов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2013. – Т. 10, № 2. – С. 227–232.

26. Игнатова А.М. Перспектива использования технологии каменного литья в освоение и исследование лунной поверхности // *Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции «Минералы: строение, свойства, методы исследования».* – Екатеринбург – Миасс: УрО РАН, 2010. – С. 179–180.

27. Игнатова А.М., Артемов А.О. Синтетические минеральные сплавы как износостойкий материал верхнего слоя дорожного покрытия // *Вестник гражданских инженеров.* – 2013. – № 1 (36). – С. 102–111.

28. Игнатова А.М., Игнатов М.Н. Использование ресурсов реголита для освоения лунной поверхности [Электронный ресурс] // *Международный журнал экспериментального образования.* – 2013. – № 11-2. – С. 101–110. – URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4325> (дата обращения: 02.04.2023).

## References

1. Kondrashin K.G., Pilipenko V.N., Golubnicheva E.M. The possibility of thermal strengthening of soils. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea*, 2021, no. 2 (36), pp. 20-25.

2. Yurdanov A.P. Thermal hardening of soils in construction. Moscow, Stroyizdat, 1990, 128 p.

3. Smirnov V.A., Work E.N., Goncharov E.V. Thermal reinforcement of loosely connected soils and rocks during mining operations. *Notes of the Mining Institute*, 2011, vol. 190, pp. 37-41.

4. Ibragimov E. Forecasting stress-strain behavior of a thermally-stabilized base. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, no. 55(6), pp. 433-437.

5. Ibragimov E. Experience using heat pumps as soil heat stabilization systems in a cryolithological zona. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2015, no. 52(5), pp. 273-276.

6. Nikitin V.P. Methods of thermal treatment of soils for road construction. Moscow, Informavtodor, 1993, 40 p.

7. Igosheva L.A., Grishina A.S. Review of the basic methods of the ground improvement. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i Arhitekturs*, 2016, vol. 7, iss. 2, pp. 5-21. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01

8. Filatov M.M. Improvement of clay dirt roads by firing. Moscow, Transpechat NKPS, 1928, 114 p.

9. Bezruk V.M. Stabilization of the bearing capacity of soils by heating. *Stabilization of soils: Collection of articles of DorNII*. Moscow, Publishing house Gushosdor, 1938, pp. 34-60.

10. Netushil A.A., Kovitsky V.Y., Kudrin V.N. [et al.]. High-frequency heating of dielectrics and semiconductors. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1959, 480 p.

11. Goncharova L.V. Fundamentals of artificial soil improvement. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1973, 376 p.

12. Spector Y.I., Denisov O.L., Shchepetov A.E., Toporov S.V. A new technology for the device of foundations and foundations with thermal soil reinforcement by a microwave field. *European Association of Geologists and Engineers. Conference Proceedings, 6th meeting of EAGE/EEGS*, September 2000, pp. 51-56.. DOI: 10.3997/2214-4609.201406315.

13. Zadvornev G.A., Zarubin B.M. Plasma-impact technology for obtaining bases of increased bearing capacity. *Izvestiya SB AN SSSR. Ser. tehn. nauk.* Novosibirsk, Nauka, 1988, no. 21, pp. 54-59.
14. Efimenko V.N., Charykov Y.M. Prospects for the development of electrothermal geotechnology of soil transformation in road construction. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2018, vol. 20, no. 1, p.197–207.
15. Pashatsky N.V., Kravchenko I.T. Heat flows in a plasma torch with hot. *IFZH*, 1985, vol.48, no. 2, pp. 338-339.
16. Lykov A.V. Heat and mass transfer. Moscow, Energiya, 1978, 480 p.
17. Vladimirov V.S. Equations of mathematical physics. Moscow, Nauka, 1976, 528 p.
18. Baraishchuk S.I., Egorov V.L., Syrotyuk V.V., Strunin V.I. Mathematical modeling of the thermal effect of low-temperature plasma on the treated surface. *Actual issues of construction and operation of automobile roads / sb. sci. tr. SibADI*, Omsk, OmPI, 1992, pp. 60-63.
19. Shestakov A.N., Sirotyuk V.V., Baraishchuk S.I., Egorov V.L. The use of effective thermophysical characteristics in solving nonlinear boundary value problems. *Proceedings the International Conference. "Modern problems of transport construction, motorization and highly intelligent scientific and pedagogical technologies*, Omsk, SibADI Publishing House, 2000, pp. 16-19.
20. Sirotyuk V.V., Pogrebinsky G.M. Processes of structure formation during plasma thermal treatment of soils to the stage of silicate melt. *Refractories and technical ceramics*, 2000, no. 1, pp. 33-36.
21. Bartenev G.M. Structure and mechanical properties of inorganic glasses. Moscow, Stroyizdat, 1966, 216 p.
22. Bartenev G.M. Mechanical properties and heat treatment of glass. Moscow, Goststroizdat, 1960, 164 p.
23. Kingeri U.D. Introduction to ceramics. Moscow, Stroyizdat, 1967, 499 p.
24. Sirotyuk, V.V., Arkhipov V.A. Installation procedure for in-situ melted-soil piles using a low-temperature plasma generator. *Soil Mech Found Eng*, 1999, no. 36, pp/ 217–222. DOI: 10.1007/BF02471287/
25. Ignatova A.M. Mechanism of deformation, cracking and destruction of structural components of synthetic mineral alloys. *Fundamental problems of modern materials science*, 2013, vol.10, no. 2, pp. 227-232.
26. Ignatova A.M. The prospect of using stone casting technology in the exploration and exploration of the lunar surface. *Materials of the II All-Russian Youth Scientific Conference "Minerals: structure, properties, research methods"*. Yekaterinburg, Miass, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2010, pp. 179-180.
27. Ignatova A.M., Artemov A.O. Synthetic mineral alloys as a wear-resistant material of the upper layer of the road surface. *Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 1 (36), pp. 102-111.
28. Ignatova A.M., Ignatov M.N. The use of regolith resources for the exploration of the lunar surface. *International Journal of Experimental Education*, 2013, no. 11-2, pp. 101-110, available at: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4325> (accessed 02 April 2023).