

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 69.05

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-155-167

*М.О. АНУФРИЕВ, М.М. ТИТОВ,  
Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА БЕТОННОЙ СМЕСИ

Целью работы является создание малоэнергоемкой и малооперационной технологии электротермообработки бетонной смеси и бетона.

Одной из важнейших задач является разработка новых подходов к совершенствованию технологии бетонирования с разогревом бетонной смеси непосредственно у места укладки.

Для этого требуется устранить малозатратным способом локальный перегрев смеси и быстрое обрастание фазных электродов бетоном из-за проявления так называемого краевого эффекта, возникающий на краях электродов независимо от их формы.

Для реализации малозатратного устранения локального перегрева смеси и быстрого обрастания бетоном фазных электродов необходимо изучить картину электротепловых полей в зоне перегрева.

На основе исследований предложено и запатентовано усовершенствованное устройство для технологии электроразогрева бетонной смеси за счет выравнивания электрических полей в бетонной смеси узкими накладками на фазные электроды.

Причиной возникновения краевого эффекта является фундаментальный принцип отсутствия тангенциальной составляющей величины зарядов на поверхности электрода, т. е. заряды находятся во взаимно уравновешенном состоянии. Это состояние обеспечивается их скоплением на ребрах электродов. Вызываемая этим неравномерность напряженности электрического поля и плотности тока и приводит ко всем отрицательным последствиям. Но проявляется эта неравномерность в локальной области у торца электрода и купировать её можно также у торца узкой полосой диэлектрика.

**Ключевые слова:** технология строительства; зимнее бетонирование; электрод; фундаментальный принцип; купирование краевого эффекта.

**Для цитирования:** Ануфриев М.О., Титов М.М. Совершенствование устройств для предварительного электроразогрева бетонной смеси // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 4. С. 155–167.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-155-167

*M.O. ANUFRIEV, M.M. TITOV,*

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering*

## **IMPROVEMENT OF DEVICES FOR PRELIMINARY ELECTRIC HEATING OF CONCRETE MIXTURE**

**Purpose:** The aim of this work is to create low-power and low-operational technology of electric heat treatment of concrete mixture and concrete. One of the most important tasks is the development of new approaches to the improvement of the concrete casting technology with the concrete mix heating during concrete placement. This requires elimination of the local overheating of the mixture and the rapid concreting of phase electrodes due to the development of the so-called edge effect. It occurs at the edges of electrodes, regardless of their shape. To realize the low-cost elimination of local overheating of the mixture and concreting of phase electrodes, it is necessary to study the behavior of the electric heat fields in the overheating zone. **Outcomes:** Based on this research, the improved device for the electric heat treatment of concrete mixture is proposed and patented. The device is based on the electrical field grading in the concrete mixture using narrow plates on phase electrodes. **Research findings:** The edge effect is based on the fundamental principle of the absence of the tangential component of charges on the electrode surface, that is, charges are in a mutually balanced state. This condition is provided by their accumulation on the edges of electrodes. The resulting non-uniformity of the electric field strength and current density lead to negative consequences. But this non-uniformity is manifested in the local area at the end of electrode and can be stopped at the electrode end by a narrow dielectric strip.

**Keywords:** construction technology; winter concreting; electrode; fundamental principle; edge effect.

**For citation:** Anufriev M.O., Titov M.M. Sovereshnstvovanie ustroystv dlya predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnoi smesi [Improvement of devices for preliminary electric heating of concrete mixture]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 4. Pp. 155–167.

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-4-155-167

### **Введение**

В современной экономической ситуации строительной отрасли РФ особое значение приобретает эффективность используемых технологий в любом виде строительных работ. Применительно к технологии зимнего бетонирования есть все предпосылки для возрождения метода предварительного электроразогрева бетонной смеси (далее ПЭРБС), т. к. по оценкам многих авторов этот метод наиболее эффективен как технологически, так и экономически, поскольку позволяет сократить энергозатраты в 3–5 раз и сроки термообработки в 2–3 раза [1, 2]. Это происходит благодаря тому, что только в технологии ПЭРБС полностью реализуются основные закономерности физико-химии твердения бетона – закон прочности, закон действия масс, правило Аррениуса, принцип Ле-Шателье и др. [3].

Во времена массового применения технологии ПЭРБС (1965–1991 гг.) при выполнении процесса электроразогрева бетонной смеси в поворотных бункерах было замечено, что происходит закипание воды затворения бетонной смеси в области фазных электродов уже через 2–4 мин от начала процесса. И это была серьезная проблема, т. к. приводила довольно быстро к невозможности производить электроразогрев с требуемой скоростью – электроды

обрастали толстым слоем бетона, что снижало скорость и конечную температуру разогрева. В то время предлагалось устранять это явление всевозможными путями: устраивали щелевые вырезы в электродах, наваривали трубы на торцах электродов или изолировали краской края электродов и многое другое. Но эффект так и оставался прежним [4].

Поэтому устранение малозатратным способом локального перегрева смеси и быстрого обрастания фазных электродов бетоном со всеми отрицательными последствиями (снижение скорости разогрева и конечной температуры) является в настоящее время актуальным.

Сегодня проблема электроразогрева усугубляется ещё и тем, что в подавляющем большинстве случаев в массовом строительном производстве утрачены компетенции применения данного метода. Начиная с нулевых годов при оживлении строительства, но при отсутствии достаточных установленных мощностей на стройплощадке стали использовать греющие провода для электротермообработки бетона. Этот метод требует меньшей мощности, но время прогрева увеличивается в 3–5 раз по сравнению с ПЭРБС. Таким образом, на сегодняшний день при условии получения достаточной мощности или от городских сетей или местного источника энергоснабжения, что все чаще используется на строительных площадках, вполне возможно возродить данный метод и тем самым повысить эффективность технологии зимнего бетонирования.

По мере исследования вышеназванной проблемы были предложены способы её решения. Предлагалось делать электроды из тонкого металла не более 1 мм толщиной [5, 9] или выполнять устройства для разогрева бетонной смеси, где стенки бункера, примыкающие к фазным электродам, выполнялись из диэлектрика [6, 10, 11]. Такие решения хоть и приводят к положительным результатам, но являются дорогостоящими и трудноприменимыми на каждой стройке, поскольку также требуют высоких компетенций при изготовлении устройств и больших финансовых затрат.

В связи с этим возникает необходимость в разработке таких устройств, которые были бы дешевле, проще и доступней в использовании, но также решали бы указанную проблему.

Объектом настоящего исследования является электродная группа разогревающего устройства, а предметом исследования будет являться величина таких параметров процесса электроразогрева, как напряженность электрического поля, объемные тепловыделения, степень локального перегрева и др.

В связи с этим задачей данной работы является детальное исследование процесса и физики возникновения и развития приэлектродного кипения бетонной смеси, которое позволило бы выявить вызывающую его фундаментальную закономерность и на этой основе найти пути решения проблемы. Метод исследования, примененный в работе, – численный эксперимент, реализуемый при помощи программных комплексов. Для осуществления поиска первопричины возникновения данного явления необходимо выявить и исследовать всю последовательность возникающих явлений. Поскольку первоисточником прохождения электрического тока являются электрические заряды, надо начать с изучения расположения этих зарядов на поверхности проводника.

Основы электростатики заложили работы Ш. Кулона и Б. Франклина; найденный последним закон электрических взаимодействий дал возможность

Гауссу, Пуассону и др. создать изящную в математическом отношении теорию, но трудно поддающуюся аналитическому решению для практических задач [7].

Из электростатики известно, что точное распределение зарядов на электродах с самого начала неизвестно; заряды вынуждены сами распределять себя по поверхности электрода с учетом его формы и окружающих заряженных тел так, чтобы весь проводник (электрод) приобрел одинаковый потенциал [8].

Это происходит автоматически вследствие фундаментального принципа отсутствия тангенциальной составляющей величины заряда создаваемого им потенциала на поверхности проводника, т. е. этот принцип говорит о том, что ток не может двигаться по поверхности проводника из-за наличия заряда, и из этого принципа вытекает, что заряды растекаются таким образом, чтобы прийти в равновесие между собой. Отрицательные заряды выталкиваются из металла на поверхность проводника и по поверхности также отталкиваются друг от друга. Но чтобы эта система зарядов пришла в равновесие, они на ребрах скапливаются в очень большом количестве, в сотни раз превышающем их плотность по поверхности проводника для того, чтобы уравновесить систему зарядов на поверхности электрода.

Рассчитать это количество зарядов на поверхности тела на сегодняшний день невозможно, но современное программное обеспечение, решая численными методами уравнение Пуассона, позволяет оценить качественные и количественные характеристики всевозможных полей, в том числе и их распределение от потенциала и до конечных температурных потоков в электропроводной среде. Одним из таких программных средств является программный комплекс ELCUT 5.7 Professional Edition, который позволяет задавать шаг минимальной дискретизации для более детальной проработки исследуемой области поля. Программа дает возможность оперировать со следующими локальными и интегральными физическими величинами: скалярный электрический потенциал  $U$ ; вектор напряженности электрического поля  $E$ ; вектор плотности тока  $j$ , мощность тепловыделения в заданной точке объема  $W$ , температура  $t$ , градиент температуры  $G_r$  и плотность теплового потока  $F$ . ПК ELCUT 5.7 позволяет визуализировать результаты расчетов. Возможность задавать шаг минимальной дискретизации впервые позволила получить детальную картину распределения  $j$  и  $t$  в области края фазного электрода, которую невозможно получить экспериментально. Применяемые до настоящего времени инструменты (методы): использование физических моделей, производственных устройств, постановка и решение аналитическими и численными методами математических задач распределения электрических и тепловых полей – очень затратные и требуют большого количества времени, а экспериментальные исследования не позволяют построить достаточно точную картину происходящего.

После включения тока на фазном электроде возникает заряд и распространяется по всем поверхностям электрода (рис. 1).

Несмотря на крайне неравномерное распределение зарядов по поверхности электрода, общий заряд описывается известным уравнением

$$Q = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R \int \vec{E} \cdot d\vec{S}. \quad (1)$$

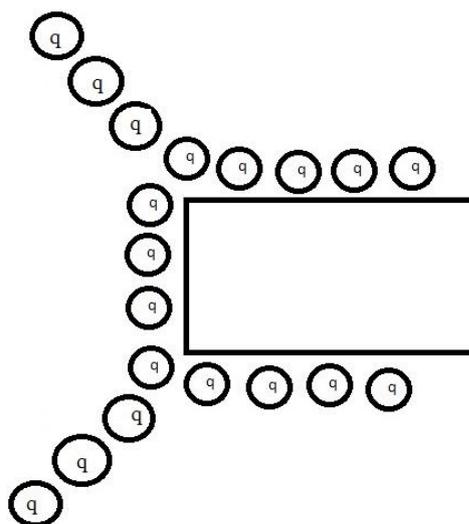


Рис. 1. Картина распределения зарядов на плоскости и ребре ортогонального фазного электрода

Что касается перемещения заряда, тут можно отметить следующее: если частица с зарядом  $q$  переносится в электрическом поле вдоль некоторого пути, то действующие на нее силы поля совершают работу. Отношение этой работы к величине переносимого заряда представляет собой физическую величину, называемую электрическим напряжением  $U$ . С помощью математического моделирования в программе ELCUT получаем картину эквипотенциалей, возникающих в бетонной массе (рис. 2).

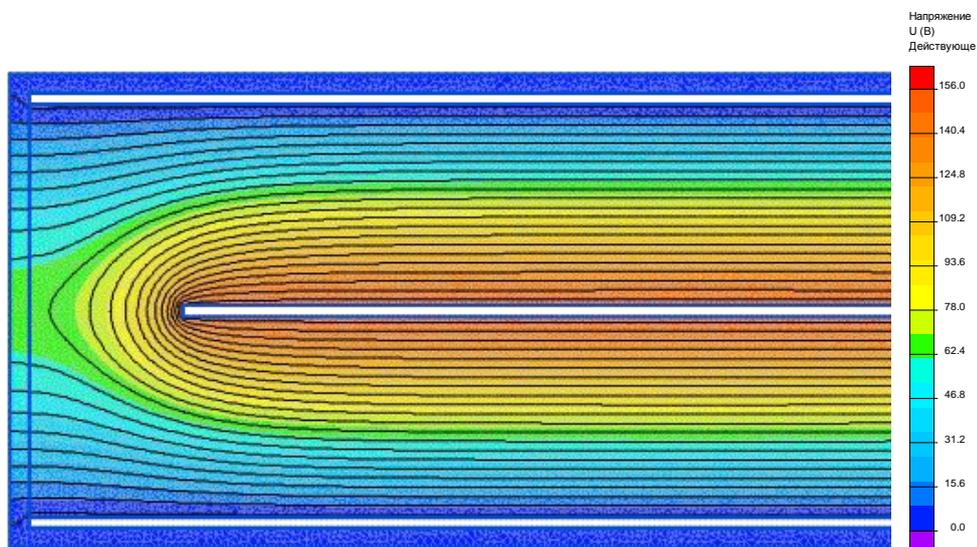


Рис. 2. Линии эквипотенциалей в бетонной смеси ( $U$ )

$$U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2)$$

Изолинии потенциала, возникающие в общей массе бетона от фазного до нулевого электрода, проходят от 140 В на фазном электроде к 0 В на корпусе соответственно.

Электрическое напряжение представляет собой работу  $A$ , совершаемую над зарядом  $q$  при переносе его из одной точки в другую. Если говорить о характере распределения этих зарядов по плоскости электрода, тут важно обратить внимание на то, что концентрация зарядов в угловой части выше, чем на боковой грани. Это объясняется установившимся состоянием равновесия этих зарядов, вследствие чего одноименные заряды, сконцентрированные на наружной поверхности электрода, пытаясь оттолкнуться друг от друга, воздействуют на соседние электроны с взаимной силой, которая уравнивается их большим количеством на ребре.

Как уже было сказано, при перемещении над зарядами совершается работа, и там, где концентрация этих зарядов выше, т. е. в угловой части, совершается большая работа, нежели на боковой грани электрода. Об этом говорит различное падение напряжения на единицу длины в единицу времени на углу и боковой части, что показывает как картина в ПК ELCUT 5.7, так и множественные эксперименты в области электроразогрева. Большой градиент потенциала на углу характеризует соответственно большую напряженность поля в этом месте, ведь величина  $E$  прямо пропорциональна падению напряжения  $U$ .

В общей массе бетона напряженность электрического поля от плоскости электрода к корпусу не превышает 2,1 В/см (рис. 3).

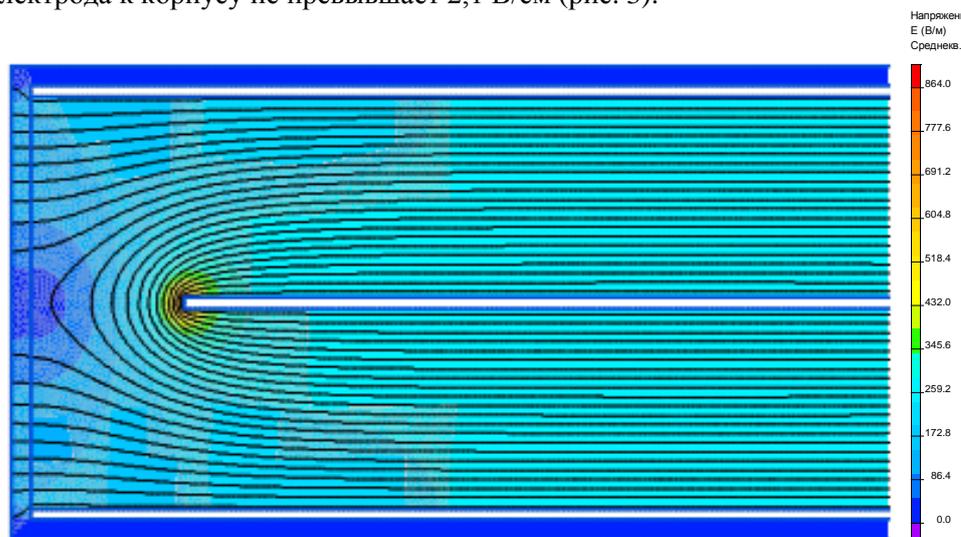


Рис. 3. Напряженность электрического поля в бетонной смеси ( $E$ )

$$E = -\text{grad}U. \quad (3)$$

А на ребре электрода под углом  $45^\circ$ , наоборот, возникает высокая напряженность до 10,6 В/см. Впервые это удалось показать наглядно с помощью численного эксперимента программного комплекса Elcut, и объясняется это высокой

концентрацией зарядов на ребре электрода. Заряды создают условия для возникновения высокой напряженности по этому направлению, поэтому до появления программных средств по реализации численных методов всех исследователей вводила в заблуждение причина возникновения перегрева – они измеряли напряжение во всех частях электрода – оно было одинаковым, а кипело вначале только в одном месте – на конце электрода, а потом во всех местах. Но напряженность была разная из-за того, что заряды были в скоплении на ребрах, а измерить их количество не представлялось возможным.

На рис. 4 показано направление вектора максимальной плотности тока  $n$  в бетонной смеси. На рис. 4, а мы видим, что на плоскости электрода плотность тока равна приблизительно  $80 \text{ А/м}^2$ , на краю электрода – доходит до  $180 \text{ А/м}^2$ . При более детальном рассмотрении картины по направлению  $n$  (рис. 4, б) видно, что у самого металла плотность тока на ребре  $800 \text{ А/м}^2$ . Вот это и есть причина начала кипения смеси у ребра электрода.

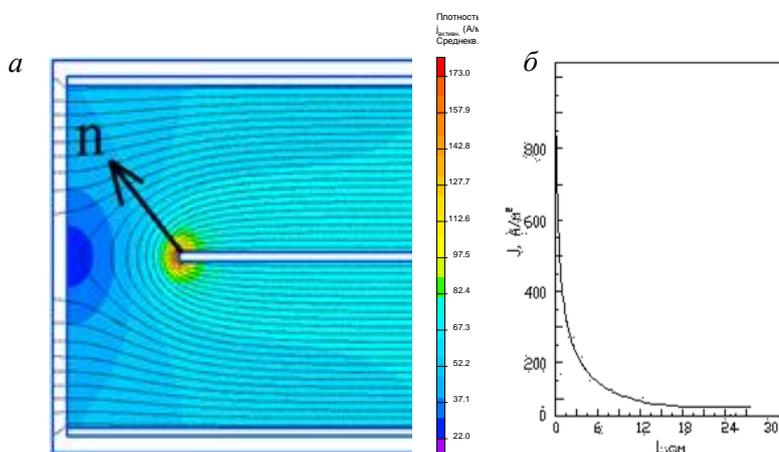


Рис. 4. Плотность тока в бетонной смеси ( $j$ ) (а); плотность тока от ребра электрода по направлению максимума  $n$  (б)

$$j = \frac{E}{\rho}. \quad (4)$$

Характер тепловыделения в бетоне (рис. 5) такой же, как и у плотности тока, высокие тепловыделения возникают вблизи угла электрода –  $6,6 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3$ , в общей массе бетона тепловыделения равны  $0,3 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^3$ .

$$\omega = q = j \cdot E = \frac{E^2}{\rho}. \quad (5)$$

На рис. 6 видно, что температурное пятно, равное  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , смещено в массу бетона на расстояние 1 см по направлению  $n$ .

$$\Delta t = \frac{P \cdot \Delta \tau}{c \cdot m}. \quad (6)$$

Возможность задавать шаг минимальной дискретизации позволила получить детальную картину распределения  $j$  и  $t$  в области края фазного электрода, которую невозможно получить экспериментально.

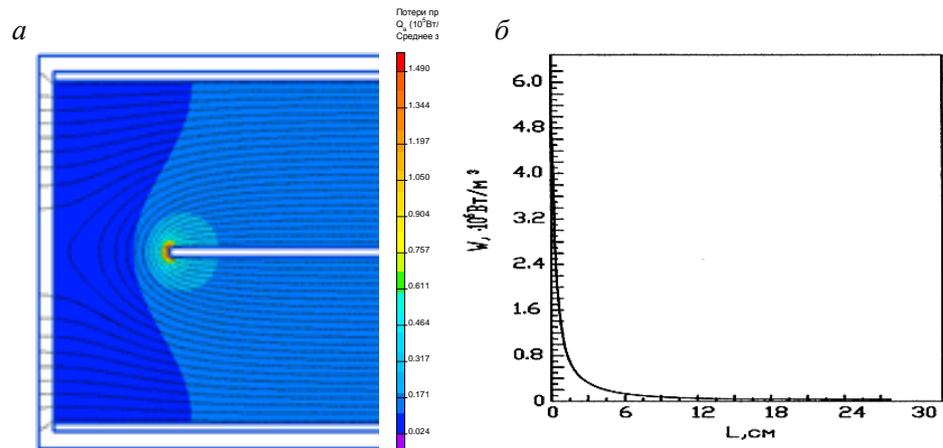


Рис. 5. Тепловыделения в бетоне ( $\omega = q$ ) (а); удельное тепловыделение от ребра электрода по направлению  $n$  (б)

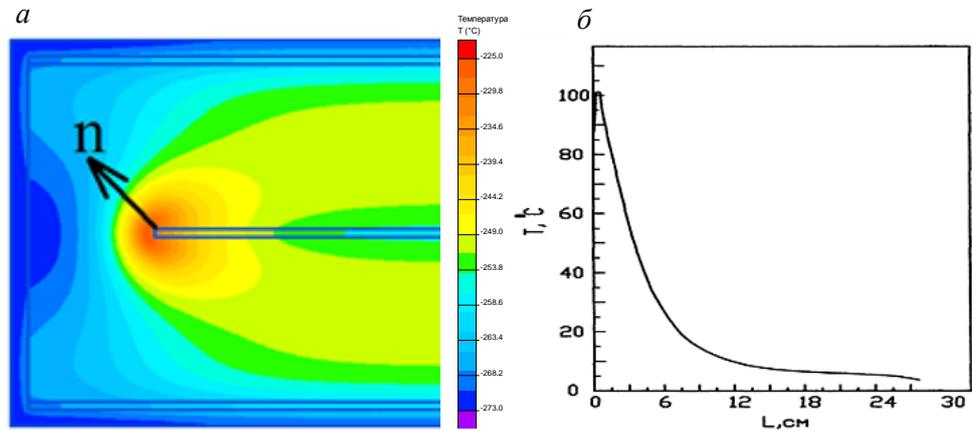


Рис. 6. Температурные поля к концу процесса электроразогрева бетонной смеси ( $\Delta t$ ) (а); температура от ребра электрода по направлению  $n$  (б)

$$G_r t = \frac{\Delta t}{l}. \quad (7)$$

Рис. 7 демонстрирует смещение пятна максимального тепловыделения от ребра электрода по направлению  $n$  на 1,5–2 см. Там значимый градиент температуры максимален.

Векторы тепловых потоков (рис. 8) наглядно показывают причину возникновения приэлектродного кипения – тепловое пятно нагревает металл электрода до 100 °С, и возникает приэлектродное кипение воды затворения бетонной смеси.

$$F = -\lambda \text{grad}t. \quad (8)$$

Поскольку тепловыделения, а значит, и температура пропорциональны плотности тока в квадрате, то наибольшая температура (100 °С), в момент

начала приэлектродного кипения воды затворения, возникает в области ребер и торца электрода.

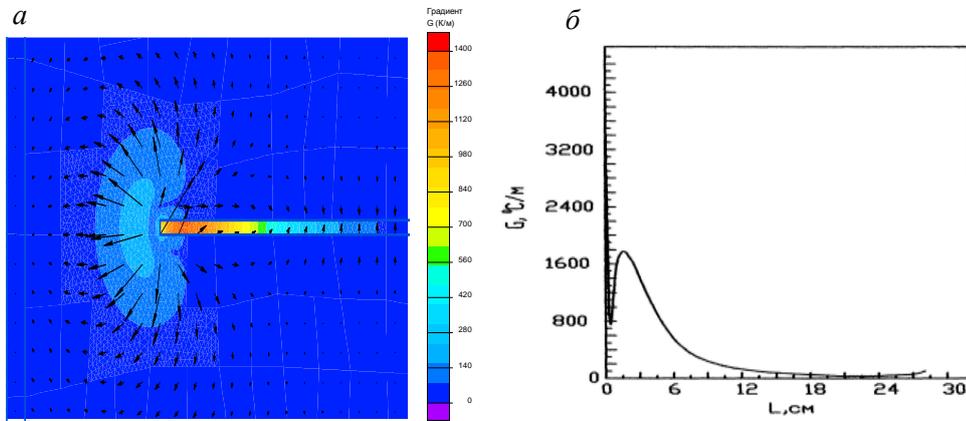


Рис. 7. Векторы температурных градиентов от ребра по направлению  $n$  (а); градиент температуры в бетонной смеси ( $G_r, t$ ) (б)

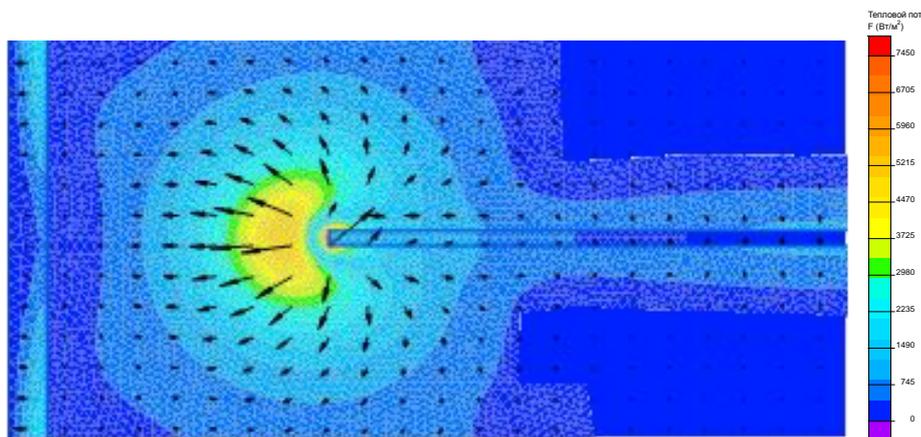


Рис. 8. Векторы тепловых потоков в бетонной смеси ( $F$ )

Таким образом, получаем связь между всеми приведенными выше решениями (таблица).

### Связь полей

$Q$	$U$	$E$	$j$
Заряд на электроде	Напряжение на фазном электроде	Напряженность электрического поля	Плотность тока
$Q = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R \int \vec{E} \cdot d\vec{S}$	$U = \varphi_1 - \varphi_2$	$E = -\text{grad}U$	$j = \frac{E}{\rho}$

Окончание таблицы

$Q$	$U$	$E$	$j$
Ампер·сек	Вольт	Вольт/метр	Ампер/метр <sup>2</sup>
$\omega = q$	$\Delta t$	$G_r t$	$F$
Удельные тепло-выделения	Прирост температуры от тепловыделения	Температурный градиент	Плотность теплового потока
$\omega = q = j \cdot E = \frac{E^2}{\rho}$	$\Delta t = \frac{P \cdot \Delta \tau}{c \cdot m}$	$G_r t = \frac{\Delta t}{l}$	$F = -\lambda \text{grad} t$
Ватт/метр <sup>3</sup>	°С	°С/метр	Ватт/метр <sup>2</sup>

### Анализ, обсуждение и выводы по результатам исследования

Имеющийся объем проведенных экспериментов с использованием программного комплекса ELCUT позволяет оценить неравномерность температурных полей, вызванную концентрацией зарядов на ребре электродов. При чем чем острее край, тем выше концентрация.

На основании проведенных численных экспериментов можно заключить следующее: главной причиной возникновения краевого эффекта является фундаментальный принцип отсутствия тангенциальной составляющей величины заряда на поверхности электрода, т. е. заряды находятся во взаимно уравнивающем состоянии. Вызываемая этим неравномерность напряженности электрического поля возрастает в десятки раз при приближении к угловой части электрода. Вызываемая этим неравномерность напряженности электрического поля и плотности тока и приводит ко всем отрицательным последствиям. Но проявляется эта неравномерность в локальной области у торца электрода, и купировать её можно также у торца узкой полосой диэлектрика.

Качественно новым устройством, устраняющим все отрицательные моменты процесса, вызванные краевым эффектом, является электроразогревающее устройство (ЭРУ), в котором фазные электроды заглублены в диэлектрик и верхние ребра находятся в воздухе в процессе электроразогрева [6], но это устройство является достаточно дорогим и сложным в производстве.

На основании установленного данным исследованием характера проявления этой неравномерности в локальной области у торца электрода и возможности купировать её у торца узкой полосой диэлектрика предложен новый способ защиты электродов при электроразогреве бетонной смеси.

На него был получен патент № 2660953 «Способ защиты электродов при электроразогреве бетонной смеси». Суть его поясняется на рис. 9, где изображено устройство для электроразогрева бетонной смеси в ортогональной проекции, реализующее заявляемый способ защиты электродов: план, разрез А-А и разрез В-В. На рис. 10 – узел А – в ортогональной проекции сопряжение фазного электрода 2, вертикальной электроизоляционной пластины 4, горизонтальной электроизоляционной гибкой пластины 3 и упорной горизонтальной электроизоляционной пластины 5.

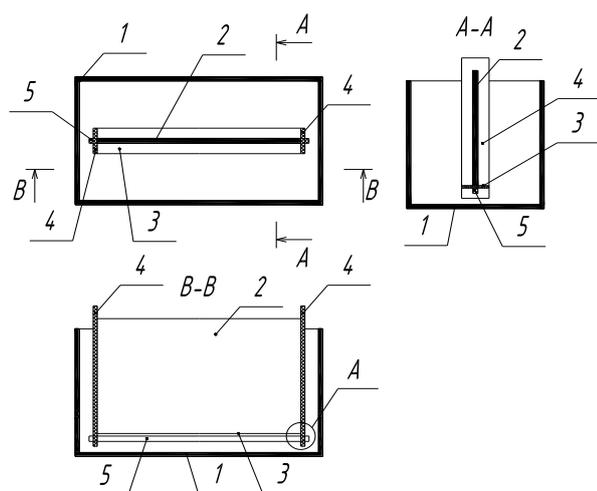


Рис. 9. Устройство для ПЭРС

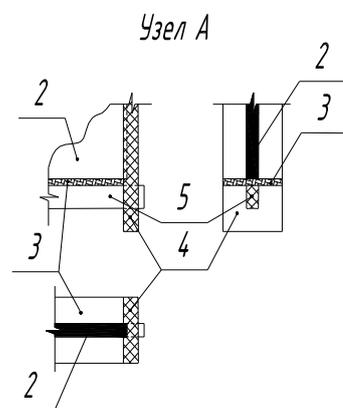


Рис. 10. Узел примыкания диэлектрика

В имеющий токоподводящие приспособления цельнометаллический корпус 1, в качестве которого может быть использован обычный строительный бункер – поворотный или неповоротный (но с прямоугольными очертаниями в плане), устанавливают фазный электрод 2 плоский металлический или несколько таких электродов, механически соединенных в электродную группу, в зависимости от результатов электротехнического расчета всего устройства и фиксируют любым известным способом.

Фазные электроды 2 должны быть параллельны боковым стенкам металлического корпуса 1. Фазные электроды 2 по вертикальной части периметра, соприкасающейся с электроизоляционными пластинами 4, заглубляют герметично в пазы этих электроизоляционных пластин 4 на глубину, не меньшую толщины фазного электрода 2.

Электроды выполнены опускаемыми в бункер с бетонной смесью (на время процесса электроразогрева) и в корпусе бункера фиксируются, но не закрепляются.

Для облегчения погружения электродов в бункер с бетонной смесью и подъема их после электроразогрева вертикальные боковые электроизоляционные пластины 4 выполнены из твердого диэлектрика, а нижняя горизонтальная 3 – из плоского гибкого диэлектрика и имеют ширину от 100 до 200 мм.

Угол между плоскостью электрода 2 и электроизоляционными пластинами 4 и 3 должен всегда быть не более 90°. Толщину фазного электрода 2 принимают достаточной для восприятия механических нагрузок. Например, принимают толщину, равную 6–12 мм.

При этом свободные торцы фазных электродов 2, т. е. торцы, не соприкасающиеся с электроизоляционными пластинами электродов, размещают выше уровня разогреваемой бетонной смеси.

Для электроразогрева бетонной смеси токоподводящие приспособления корпуса 1 зануляют, а на фазные электроды 2 подают напряжение от трехфазной сети. Бетонную смесь разогревают до требуемой температуры за счет прохождения по ней переменного электрического тока между фазными электродами 2 и между фазными электродами 2 и боковыми стенками металлического корпуса 1.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Трембицкий С.М.* Технические организационные основы зимнего бетонирования монолитных железобетонных конструкций с прогревом бетона // *Бетон и железобетон*. 2007. № 6. С. 20–24.
2. *Трембицкий С.М.* Энерго- и ресурсосбережение в заводской и строительной технологии изготовления железобетонных изделий и конструкций. Москва : ОАО «Издательство «СТРОЙИЗДАТ»», 2004. 262 с.
3. *Арбеньев А.С.* От электроразогрева к синергобетонированию виброэлектроразогревом. Владимир : Изд-во Владим. гос. техн. ун-та, 1996. 336 с.
4. *Шешуков А.П., Арбеньев А.С., Цюпка Н.К., Витько С.Д.* Влияние площади электродов на качество электроразогрева бетонной смеси // *Совершенствование технологии строительного производства: межвузовский тематический сборник / под ред. А.И. Гныри*. Томск : Изд-во Томского университета, 1980. С. 106–113.
5. *Электрод для электронагрева токопроводящих смесей*. Пол. решение о выдаче а. с. по заявке 4713098/24-89 / М.М. Титов, А.В. Башаев, И.С. Зельман.
6. *Пат. 2193484 РФ*. Способ защиты электродов при электроразогреве бетонной смеси / М.М. Титов, Л.В. Куликова, А.В. Рязанов. Бюл. № 33 от 27.11.2002 г.
7. *Иоссель Ю.Я.* Расчет полей в энергетике. Ленинград : Энергия, 1978. 272 с.
8. *Карпушкина С.А.* Анализ точности численных решений краевых задач на основе аналитических решений // *Exponenta Pro. Математика в приложениях*. 2004. № 3–4 (7–8). URL : <http://www.exponenta.ru/journal>
9. *Титов М.М.* Неравномерность электротепловых полей в разогревающих устройствах // *Изв. вузов. Строительство*. 2008. № 10. С. 51–54.
10. *Титов М.М.* Технология предварительного электроразогрева бетонной смеси с использованием современного оборудования // *Изв. вузов. Строительство*. 2009. № 3–4. С. 56–62.
11. *Гныря А.И., Титов М.М.* Новое слово в разработке технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси // *Технологии бетонов*. 2008. № 1. С. 84–87.

#### REFERENCES

1. *Trembitsky S.M.* Tekhnicheskie organizatsionnye osnovy zimnego betonirovaniya monolitnykh zhelezobetonnykh konstruksii s progrevom betona [Technical organizational bases of winter concreting of monolithic reinforced concrete structures with heating of concrete]. *Beton i zhelezobeton*. 2007. No. 6. Pp. 20–24. (rus)

2. *Trembitsky S.M.* Energo- i resursosberezhenie v zavodskoi i stroitel'noi tekhnologii izgotovleniya zhelezobetonnykh izdelii i konstruksii [Energy and resource saving in factory and construction technology of reinforced concrete products and structures]. Moscow: Stroyizdat, 2004. 262 p. (rus)
3. *Arbenyev A.S.* Ot elektrorazogreva k energobetonirovaniyu vibroelektorazogrevom [From electric heating to concreting by vibrating electric heating]. Vladimir, 1996. 336 p. (rus)
4. *Sheshukov, A.P., Arseniev A.S., Tsiupko N.T., Vitko S.D.* Vliyanie ploshchadi elektrodov na kachestvo elektrorazogreva betonnoi smesi. Sovershenstvovanie tekhnologii stroitel'nogo proizvodstva [The effect of electrode area on the quality of electric heating of concrete mix]. In: Construction technology improvement, A.I. Gnyrya, Ed. Tomsk: TSU, 1980. Pp. 106–113. (rus)
5. *Titov M.M., Bashaev V.A., Zelman I.S.* Elektrod dlya elektronagreva tokoprovodyashchikh smesei [Electrode for electric heating of conductive mixtures]. Issue of Author's Certificate N 4713098/24-89. (rus)
6. *Titov M.M., Kulikova L.V., Ryazanov A.V.* Sposob zashchity elektrodov pri elektrorazogreve betonnoi smesi [Protection of electrodes at electric heating of concrete mix]. Pat. Russ. Fed. N 2193484, 2002. (rus)
7. *Iossel' Yu.Ya.* Raschet polei v energetike [Calculation of fields in energy sector]. Leningrad: Energy, 1978. 272 p. (rus)
8. *Karpushkina S.A.* Analiz tochnosti chislennykh reshenii kraevykh zadach na osnove analiticheskikh reshenii [Analysis of accuracy of numerical solutions of boundary problems based on analytical solutions]. *Exponenta Pro. Matematika v prilozheniyakh*. 2004. No. 3–4 (7–8). Available: [www.exponenta.ru/journal](http://www.exponenta.ru/journal) (rus)
9. *Titov M.M.* Neravnomernost' elektroteplovyykh polei v razogrevayushchikh ustroystvakh [Non-uniformity of electro-thermal fields in heating devices]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo*. 2008. No. 10. Pp. 51–54. (rus)
10. *Titov M.M.* Tekhnologiya predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnoi smesi s ispol'zovaniem sovremenogo oborudovaniya [Technology of preliminary electric heating of concrete mix using modern equipment]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo*. 2009. No. 3–4. Pp. 56–62. (rus)
11. *Gnyrya A.I., Titov M.M.* Novoe slovo v razrabotke tekhnologii predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnoi smesi [Development of new technology of preliminary electric heating of concrete mix]. *Tekhnologii betonov*. 2008. No. 1. Pp. 84–87. (rus)

#### Сведения об авторах

*Ануфриев Максим Олегович*, ассистент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, [Anufrievmo@mail.ru](mailto:Anufrievmo@mail.ru)

*Титов Михаил Михайлович*, профессор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, [agd\\_tmm48@mail.ru](mailto:agd_tmm48@mail.ru)

#### Authors Details

*Maksim O. Anufriev*, Junior Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, [Anufrievmo@mail.ru](mailto:Anufrievmo@mail.ru)

*Mikhail M. Titov*, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113, Leningradskaya Str., 630008, Novosibirsk, Russia, [agd\\_tmm48@mail.ru](mailto:agd_tmm48@mail.ru)