

**М.М. ТИТОВ, канд. техн. наук, доц. (Алтайский
государственный технический университет, г. Барнаул)**

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В РАЗОГРЕВАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

В работе показано, что первопричиной неравномерности электротепловых полей по краям фазных электродов в устройствах для электроразогрева бетонной смеси, приводящей к быстрой потере работоспособности электроразогревающих устройств любого конструктивного исполнения, является т.н. “краевой эффект”, известный из электростатики.

Метод электротепловой обработки бетона на стройках и заводах ЖБИ с предварительным электроразогревом бетонной смеси по физике проходящих в бетонной смеси и твердеющем бетоне процессов является наиболее эффективным, т.е. обеспечивающим минимальный расход энергии при максимальной скорости набора прочности в первые 1-2 суток до величин 40-70% R_{28} [1]. Однако, этот метод в настоящее время еще не получил должного распространения, потому что металл электродов (в первую очередь в области краев - торцов и ребер) нагревается со скоростью в 3-5 раз большей, чем весь объем смеси между электродами и достигает температуры порядка 100⁰С через 3-4 мин. после подачи напряжения. Затем на границе металл - бетонная смесь наступает кризис теплоотдачи и происходит кипение воды затворения и экранирование части поверхности электрода, уменьшая величину проходящего тока[2]. Этот процесс повторяется, и с каждым разом происходит налипание и схватывание бетона на электродах. Через 20-25 циклов разогрева скорость нагрева падает до 2-3⁰С/мин., что технологически неприемлемо. Следовательно, реальный процесс электроразогрева дает крайне неравномерную картину

температурных и, соответственно, электрических полей. Причину этого явления следует искать в неравномерной плотности тока на границе раздела бетонная смесь - поверхность электродных систем. Следует отметить, что, как показывают производственные наблюдения, интегральная функция плотности тока на поверхности электрода зависит от времени разогрева (т.е. от температуры и зависящей от нее величины удельного сопротивления бетонной смеси), а локальная функция плотности тока является функцией координаты точки, особенно в области краев электродов, погруженных в разогреваемую смесь. Таким образом, можно считать, что температурная неравномерность обусловлена неравномерностью плотности тока в области торцов и ребер электрода, т.е. по его краям.

Целью данной работы является определение полей плотности тока и, соответственно, распределение температурных полей для одноэлектродного электроразогревающего устройства с плоским стальным фазным электродом расчетным путем, используя методы численного моделирования. В качестве геометрической модели используем схему, представленную на рис.1.

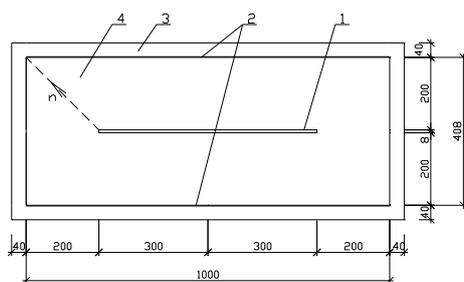


Рис.1. Схема

электроразогревающего устройства с
плоским стальным фазным
электродом.

1. Фазный электрод 0,6 x 0,3 м,
 $\delta = 8 \text{ мм}$.
2. Нулевые электроды 1,0 x 0,3 м,
 $\delta = 3 \text{ мм}$.
3. Диэлектрический короб
 $V = 1,0 \times 0,4 \times 0,3 = 0,12 \text{ м}^3$
4. Бетонная смесь
 $\gamma = 2200 \text{ кг/м}^3, \rho = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}$
5. n – направление оси X
для графиков J, W, T, G .

Электрическая нагрузка при электроразогреве в предложенной модели представляет чисто омическое сопротивление, поэтому в первом приближении можно рассматривать задачу распределения полей U и E как электростатическую [3]. В теории электромагнитного поля [4] известен метод электростатической аналогии, позволяющий в ряде случаев при расчете токов в проводящей среде воспользоваться готовыми решениями

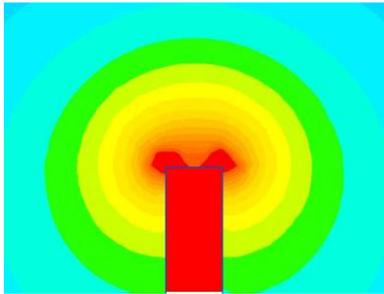


Рис.2. Плотности тока на краю электрода.

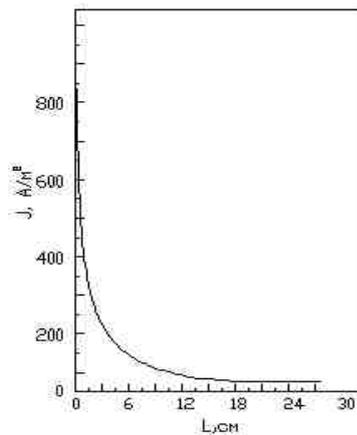


Рис.4. Плотность тока от ребра по направлению n

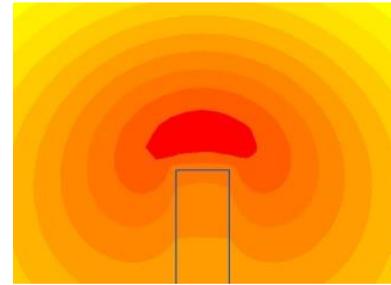


Рис.3. Температурное поле на краю электрода.

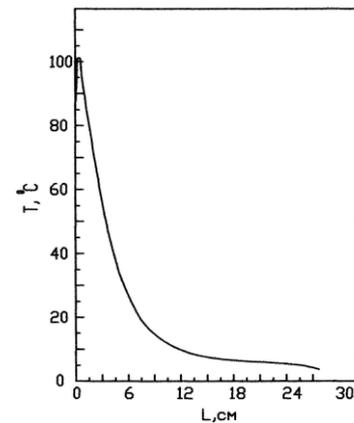


Рис.5. Температура от ребра по направлению n .

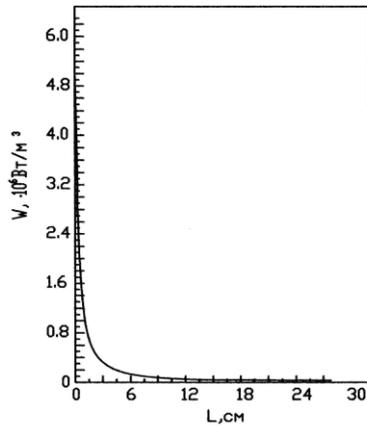


Рис.6. Удельное тепловыделение от ребра по направлению n

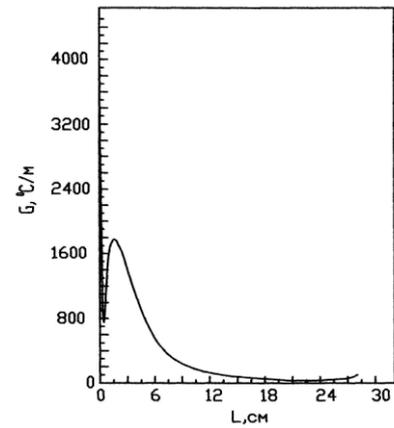


Рис.7. Градиент температуры от ребра по направлению n

соответствующих задач электростатики, т.к. напряженность электрического поля по отношению к удельному сопротивлению среды связана с плотностью тока соотношением $J = \rho^{-1}E$.

Поскольку J и E векторные величины, а ρ скалярная, то в однородной изотропной среде направление линий электрического тока всюду совпадают с направлением линий напряженности электрического поля и плотность тока всюду пропорциональна плотности линий напряженности электрического поля.

Разработанные в последнее время программные и аппаратные средства позволяют оценить качественные и количественные полевые характеристики различных конструктивных систем, включая “электрод - бетонную смесь”. Одним из таких программных средств является программный комплекс ELCUT, 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 , температуру T , вектор плотности теплового потока $F = -\lambda \text{ grad } T$.
ПП ELCUT позволяет визуализировать результаты расчетов, как в самой программе, так и в AutoCAD или Word. Приведенные здесь решения ограничиваются: $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в наиболее нагретом месте - у ребра электрода, $E=11-12\text{ В/см.}$ между электродами. Возможность задавать шаг минимальной дискретизации впервые позволила получить детальную картину распределения J и T в области края фазного электрода, которую невозможно получить экспериментально. На рис. 2,3 приведены визуализированные результаты расчета плотности тока и температуры на краю фазного электрода. На них ясно видно, что максимальная плотность тока, в десятки раз превосходящая среднее значение по плоскости электрода, локализуется в области ребер электрода. Поскольку тепловыделения, а значит и температура, пропорциональны плотности тока в квадрате, то наибольшая температура ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$), в момент начала приэлектродного кипения воды затворения, возникает в области торца электрода. Но не у самого металла, а на некотором удалении от него, 5-8мм. Для количественного анализа на рис.4,5,6,7 приводятся графики плотности тока, температуры, удельного тепловыделения и градиента температуры по направлению n от ребра электрода (под углом 45° , см. рис.1). Из графиков J и W следует, что эти параметры убывают экспоненциально, что вполне объяснимо. Но графики T и G показывают, что максимум температуры удален от ребра на те же 5-8 мм. Это обстоятельство доказывает, что большая часть тепловыделения поглощается металлом электрода в сначала в области торца, а затем, т.к. его теплопроводность в двадцать три раза больше, чем у бетонной смеси, и всем электродом. Остальное выделившееся тепло рассеивается в окружающей край электрода смеси. На рис.7 область локального минимума G показывает: слева поток тепла поглощается электродом, а справа рассеивается в бетонной смеси.

Итак – впервые расчетным путем наглядно показано, что плотность тока J максимальна на ребрах электрода, что доказывает проявление краевого эффекта. Также впервые наглядно показан механизм опережающего (по сравнению со всем объемом смеси) нагрева фазного электрода от локального источника в области края электрода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов Б.А, Ли А.И. Форсированный электроразогрев бетона.-М.: Стройиздат, 1975. – 155с.
2. Гныря А.И., Титов М.М. Новое слово в разработке технологии предварительного электроразогрева бетонной смеси. //Технологии бетонов. - №1. – 2008. –С.54-57.
3. Иоссель Ю.Я. Расчет потенциальных полей в энергетике.- Л.: Энергия,1978. – 272с.
4. Атабеков Г.И и др. Теоретические основы электротехники. Ч.2,3. М.: Энергия, 1979. – 316с.