Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. В. Г. Плеханова, т. LVII, вып. 2, 1969 г.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ СПОСОБ ПРОГРЕВА И МЕТОД КОНТРОЛЯ ЗА ТВЕРДЕНИЕМ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ КРЕПЛЕНИИ СТЕНОК СКВАЖИН

Л. Б. Некрасов, А. М. Яковлев

Создание цементных труб непосредственно в стволе скважины является актуальной проблемой. Цементные обсадные трубы могут выполнять роль эксплуатационной колонны при бурении на воду, а также перекрывать отдельные осложненные зоны, связанные с обвалами стенок скважин или поглощением промывочной жидкости.

Одной из основных трудностей формирования обсадных труб в стволе скважины является длительность твердения цементного раствора в заопалубочном пространстве. Для решения этой проблемы в настоящее время предложены и применяются такие способы ускорения твердения цементного раствора, как электрохимический метод и электропрогрев. Роль опалубки в обоих случаях выполняет электрод или связанные с ним стальные трубы.

Эти способы, наряду с положительным фактором—ускорением твердения цементного раствора, —обладают рядом существенных недостатков. Так, при применении электрохимического способа, основанного на обработке цементного раствора (или специальных смесей) постоянным током, у электродов создаются различные по химизму зоны: около анода кислая (pH до 2—3), у катода щелочная; имеет место частичный диализ воды—миграция воды к катоду. Все это снижает плотность и прочность получаемого цементного камня обсадной трубы.

При электропрогреве цементного раствора переменным током промышленной частоты (50 *гц*) непосредственно в цепь включается лишь небольшая часть цементного раствора (по линии кратчайшего расстояния между электродами), и электрическая энергия, преобразуемая в этой узкой зоне в джоулево тепло, распространяется в основную массу за счет теплопроводности. Последнее обстоятельство обусловливает значительное увеличение времени прогрева цементного раствора. К числу недостатков прогрева токами промышленной частоты следует также отнести неравномерность прогрева цементной массы по высоте скважины в связи с тем, что приходится применять многоэлектродную схему. Естественно, при этом прогрев будет наибольшим у электродов и наименьшим между ними.

Предлагаемый нами способ лишен вышеперечисленных недостатков.

Как известно, высокочастотное электрическое поле позволяет в ряде случаев непосредственно нагревать материал без применения промежуточных теплоносителей. Поскольку процесс нагрева здесь уже не связан с теплопроводностью материала, а трансформация высокочастотной энергии в тепловую происходит в самом материале по всему объему, этот процесс протекает значительно быстрее, чем при обычном механизме теплопередачи.

Предлагаемый способ прогрева цементных растворов с целью ускорения крепления стенок скважин основан на принципе бесконтактного нагрева слабопроводящих тепло материалов в высокочастотном электрическом поле.

В высокочастотном электрическом поле конденсатора цементный раствор нагревается. Поглощение высокочастотной энергии цементным раствором происходит как вследствие сквозной проводимости, так и за счет диэлектрических потерь. Величина поглощаемой энергии определяется известным выражением [3]

$$W=\omega\varepsilon' \operatorname{tg}\delta E^2 t, \qquad (1)$$

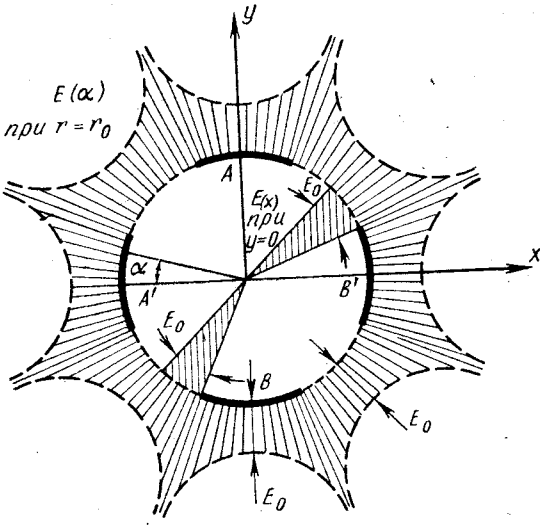


Рис. 1. Распределение электрического поля конденсатора с двумя парами дуговых электродов

где ω — круговая частота электрического поля; ε' — диэлектрическая проницаемость цементного раствора; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь цементного раствора; E — напряженность высокочастотного электрического поля; t — время действия высокочастотного поля.

Удобнее, однако, для практических расчетов пользоваться формулой удельной мощности

$$P_0=55{,}5\varepsilon' f \operatorname{tg}\delta E^2\cdot 10^{-12},\ вт/м^3; \qquad (2)$$

здесь f — частота, *гц*; E — напряженность, *в/м*.

Возникает вопрос, каким образом при различных технологических режимах осуществлять управление процессами ввода удельной мощности. Последнее выражение дает ответ на этот вопрос. Так как частота f и напряженность электрического поля E являются, по существу, техническими параметрами генератора, то регулирование ввода удельной мощности в нагреваемый раствор осуществляется выбором частоты генератора и величиной его выходного напряжения.

Поскольку необходимо прогревать заопалубочное пространство, конфигурация электродов должна обеспечивать создание в нем высокой напряженности электрического поля. Такому требованию удовлетворяет поле, создающееся снаружи конденсатора с многопарными симметричными дуговыми электродами (рис. 1).

Распределение напряженности электрического поля внутри и снаружи такого конденсатора при любом числе пар дуговых симметрич-

ных электродов описывается выражением [1]

$$E=\frac{nUr_0^n\,|\,z\,|^{n-1}}{k\,|\sqrt{[(r_0^n+z^n)^2+k\,(r_0^n-z^n)^2]\;[(r_0^n-z^n)+k\,[(r_0^n+z^n)^2]}\,|}\,, \tag{3}$$

где U—напряжение между парами электродов (AB и $A'B'$ на рис. 1); n—число симметричных пар электродов; r_0—радиус кривизны дуговых электродов; k—полный эллиптический интеграл, модуль которого

$$|\,k\,|=\mathrm{tg}^2\,\frac{\pi\,(1-m)}{4}\,;$$

m—коэффициент охвата, равный отношению поверхности электродов к общей поверхности цилиндра с радиусом r_0; $z=re^{j\alpha}=x+jy$—координата точки на комплексной поверхности. При определении E берется модуль полученного комплексного числа.

Рассмотрим распределение напряженности поля конденсатора, образованного двумя симметричными парами электродов, т. е. при $n=2$. В этом случае распределение напряженности вдоль осей x и y получается путем подстановки в уравнение (3) $z=x$, $y=jy$.

После преобразований получаем по оси x

$$E_{y=0}=\frac{2Ur_0^2x}{k\,|\sqrt{r_0^8\,(1+2k)+k^2\,(r_0^8+x^8)-2r_0^4x^4\,(1-6k)+x^8\,(1+2k)-2k^4r^4x^4}\,|}\,, \tag{4}$$

по оси y

$$E_{x=0}=\frac{2Ur_0^2jy}{k\,|\sqrt{r_0^8\,(1+2k)+k^2\,(r_0^8-y^8)-2r_0^4y^4\,(1-6k)+y^8\,(1+2k)-2k^2r^4y^4}\,|}\,. \tag{5}$$

Сравнивая формулы (4) и (5), находим, что внутри электродов распределение напряженности электрического поля вдоль осей x и y совпадает.

Теперь найдем распределение напряженности поля вдоль внешней поверхности дуговых электродов. Для этого представим $z=r_0e^{j\alpha}$. Тогда после преобразования получим

$$E_{r=r_0}=\frac{U}{4r_0k\cos^2\frac{\alpha}{2}\sqrt{\left(1-k\,\mathrm{tg}^2\,\frac{\alpha}{2}\right)\left(k-\mathrm{tg}^2\,\frac{\alpha}{2}\right)}}\,. \tag{6}$$

На основании трех последних выражений получим полную картину (внутри и снаружи) распределения электрического поля для конденсатора с симметрично расположенными двумя парами дуговых электродов.

При

$$\mathrm{tg}^2\,\frac{\alpha}{2}=k^{\pm1},$$

т. е. на краях электродов, напряженность электрического поля теоретически обращается в бесконечность. Минимальная величина напряженности приходится на середину каждого электрода. Снаружи электродов распределение напряженности будет иметь форму многолучевой звезды с числом лучей $4n$, где n—число пар электродов. С увеличением числа пар число лучей поля, естественно, также возрастает, и поле снаружи электродов становится более однородным. С учетом того, что по условиям технологии предусматривается вращение нагревательного устройства (вместе с дуговыми электродами) в скважине, целесообразно рассматривать среднюю удельную мощность, выделяю-

щуюся в заопалубочном пространстве, заполненном цементным раствором.

В этом случае удельная мощность, выделяющаяся в заопалубочном пространстве, пропорциональна среднему значению квадрата напряженности поля при α, изменяющемся от нуля до $\frac{\pi}{2}$,

$$P_{0\text{ср}}=\frac{2\omega\varepsilon''\varepsilon_0}{\pi}\int_0^{\frac{\pi}{2}} E^2(r)\,d\alpha,$$

где ε''—мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости цементного раствора; ε_0—множитель пропорциональности (в системе СИ $\varepsilon_0=8{,}855\cdot10^{-12}$ *ф/м*).

Теоретически средняя удельная мощность, выделяющаяся снаружи дуговых электродов, оказывается бесконечно большой и по мере приближения к их оси симметрии уменьшается до величины

$$P_{\text{ц}}=\omega\varepsilon''\varepsilon_0 E_0^2,$$

где $E_0=\frac{U}{r_0k\,(1+k)}$ —напряженность на оси цилиндра.

Как уже говорилось выше, высокочастотный прогрев цементного раствора сводится к возникновению в нем (равномерно по всему объему) внутренних источников тепла. В связи с этим подчеркнем, что предлагаемый способ, по существу, является бесконтактным, хотя механический контакт между электродами (как опалубкой) и формируемой цементной стенкой вовсе не исключается.

Результаты неоднократных экспериментов на модели, проведенных нами для высокочастотного прогрева различных слабопроводящих материалов, показывают, что электроды конденсатора всегда имеют температуру значительно более низкую, чем внутренние слои нагреваемого материала. Это обстоятельство имеет важное значение для предотвращения возможности затирания и схватывания электродов рабочего органа, поскольку в данном случае без ущерба для технологического режима прогрева можно вводить смазку между рабочим органом (электродами) и твердеющей цементной стенкой. В предлагаемом способе, как и во всех других известных и применяемых способах прогрева, предусматривается вращение рабочего органа (системы дуговых электродов). Вращение электродов, а следовательно, и поля позволит улучшить плотность обработки цементного раствора глубоко в трещинах, что практически неосуществимо при любых других методах контактного прогрева смесей или цементных растворов.

Так как весь процесс формирования трубы протекает глубоко в скважине, обеспечение контроля за состоянием и ходом твердения цементного раствора в заопалубочном пространстве является нелегкой задачей. Известные методы акустического контроля [3] позволяют оценивать качество уже затвердевшей трубы. Спуск такого прибора в скважину возможен только после извлечения из нее прогревающего устройства и опалубки. При таких методах контроля будут иметь место непроизводительные операции, что является их серьезным недостатком.

Предлагаемый способ бесконтактного контроля за режимом твердения цементного раствора может быть осуществлен при прогреве закрепляемого материала от начала до завершения процесса твердения. Сущность его заключается в следующем. При наличии в заопалубоч-

ном пространстве высокочастотного электрического поля в цементном растворе происходит преобразование электрической энергии в тепло. Происходящие при этом изменения в структуре цементного раствора (при последовательных стадиях твердения) сопровождаются соответствующими изменениями его электрофизических параметров: диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$. Так как при нагреве влагосодержание цементного раствора уменьшается, то оба параметра также уменьшаются и, как следствие, уменьшается и нагрузка высокочастотного генератора.

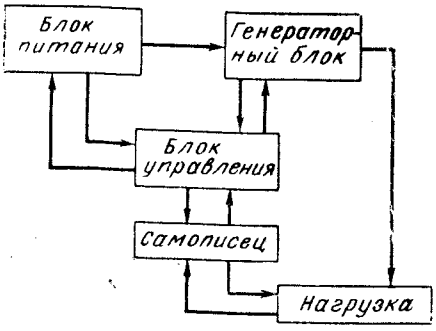


Рис. 2. Схема высокочастотного метода контроля за режимом твердения цементного раствора при креплении стенок скважин

Аналитическая зависимость между нагрузкой генератора, отнесенной к единице объема нагреваемого материала (удельной мощностью), и электрофизическими параметрами вещества имеет следующий вид [2]:

$$P_0 = 55{,}5\varepsilon' f \operatorname{tg} E^2 \cdot 10^{-12},\ вт/м^3,$$

где f—частота электрического поля, *гц*; E—напряженность поля, *в/м*.

В принципе по изменению электрофизических параметров можно судить о ходе процесса твердения цементного раствора. Однако осуществление на практике непрерывных измерений электрофизических параметров является чрезвычайно сложной задачей. Гораздо проще и надежнее можно осуществить контроль за состоянием и ходом твердения по величине тока, протекающего через нагрузку (цементный раствор),

$$I = \sqrt{\frac{P_н}{r_н}},$$

где $P_н$—мощность, выделяющаяся на нагрузке (цементном растворе), имеющем активное сопротивление $r_н$. Измерение тока, протекающего через нагрузку, производится по показаниям стрелочного миллиамперметра, которым снабжаются все электротермические высокочастотные установки (рис. 2).

Уменьшение влагосодержания на последовательных стадиях твердения цементного раствора сопровождается пропорциональным уменьшением тока, протекающего через нагрузку. С исчезновением свободно содержащейся в цементе воды падение тока, протекающего через нагрузку, практически приостанавливается. С другой стороны, отсутствие свободной воды является признаком стадии отвердевания цементного раствора. Следовательно, прекращение падения тока на миллиамперметре служит сигналом того, что процесс отвердевания подходит к концу.

Поскольку в основе рассматриваемого способа контроля лежит применение высокочастотного поля, этот способ обеспечит контроль за состоянием и ходом твердения цементного раствора не только на поверхности стенки скважины, но и в равной мере в глубоких слоях твердеющей массы и в трещинах, заполненных цементным раствором.

Так как предлагаемый способ контроля осуществляется одновременно с прогревом цементного раствора, то он позволяет решить вопрос о времени обработки и степени твердения закрепляющего материала, выбрать оптимальный режим прогрева и своевременно извлечь опалубку из скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нетушил А. В. Некоторые задачи теории высокочастотного нагрева. «Электричество», № 8, 1952.
2. Поташников В. А., Кораблев А. А. Комбинированный акустический прибор для определения динамических характеристик бетона и контроля его качества. В сб. «Физ.-мех. свойства, давление и разрушение горн. пород», вып. 2. Изд-во АН СССР, 1963.
3. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. Недра, 1966.