

А.Н. Герасимович, В.Н. Мазуркевич, Н.Н. Бобко
 ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ-СПУТНИКОВ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

В настоящее время для транспортирования к электрическим станциям и котельным жидкого топлива (мазута и др.) широко применяются теплоизолированные трубопроводы. Обогрев таких трубопроводов осуществляется паровыми, жидкостными или электрическими спутниками. Из известных видов электрических нагревателей более перспективными и электробезопасными являются ферромагнитные нагреватели-спутники, выполненные по коаксиальной схеме (рис. 1, а, б) [1]. Однако внедрение их в практику сдерживается отсутствием теоретических и экспериментальных исследований.

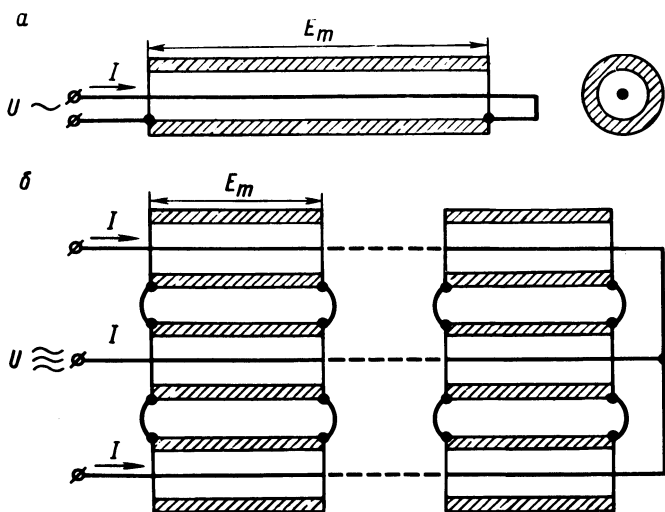


Рис. 1. Принципиальные электрические схемы ферромагнитных нагревателей.

При проектировании систем электроподогрева трубопроводов с ферромагнитными нагревателями необходимо знать их электрические характеристики, определение которых является сложной инженерной задачей. Основная трудность ее решения обусловлена тем, что электромагнитные процессы, протекающие в ферромагнитной среде, описываются нелинейными уравнениями Максвелла. Их решение приближенными полуэмпирическими методами требует тщательной экспериментальной проверки. Более строгое решение этих уравнений можно получить численными методами.

В данной работе приводятся результаты аналитического и экспериментального исследования ферромагнитных нагревателей-спутников, выполненных из сталей Ст. 2, Ст. 3, Ст. 10, Ст. 20. Решение уравнений электромагнитного поля проведено численным методом.

Электромагнитные процессы в ферромагнитном нагревателе описываются уравнениями Максвелла:

$$\begin{aligned}
 - \frac{\partial H}{\partial z} &= \gamma E(a); & - \frac{\partial E}{\partial z} &= \frac{\partial B(H)}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} = \\
 &= \mu_g(H) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (б) \quad , & &
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $E(z, t)$, $H(z, t)$ — напряженности электрического и магнитного полей в стенке трубы; $B(H)$ — индукция магнитного поля; $\mu_g(H)$ — динамическая магнитная проницаемость стали; γ — электрическая проводимость стали; z, t — пространственная и временная координаты (рис. 2).

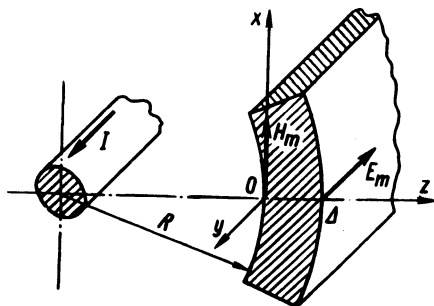


Рис. 2. Векторы электромагнитного поля в нагревателе.

Уравнения (1, а) и (1, б) после преобразований приводятся к виду

$$\frac{\partial H}{\partial z^2} = \gamma \mu_g(H) \frac{\partial H}{\partial t} . \tag{2}$$

Для решения (2) должны быть заданы начальные

$$H(z, 0) = \varphi(z) \tag{3}$$

и граничные условия

$$H(0, t) = \psi_1(t); \quad H(\Delta, t) = \psi_2(t), \tag{4}$$

где Δ — толщина стенки трубы нагревателя (рис. 2).

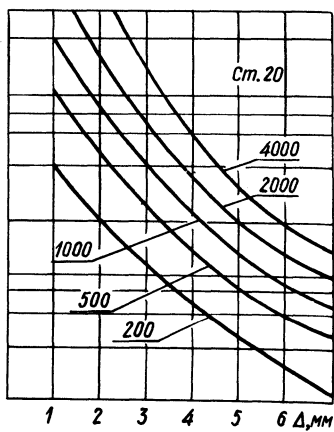
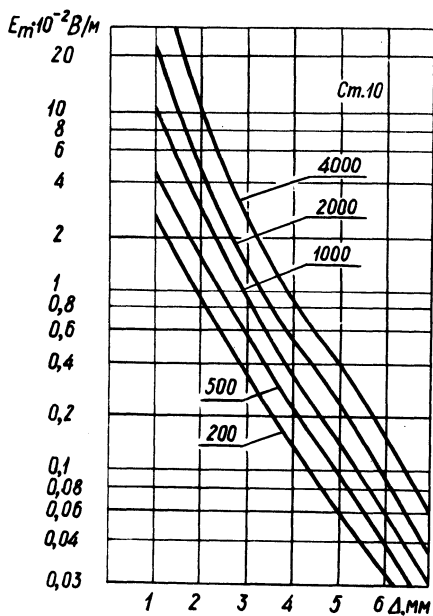
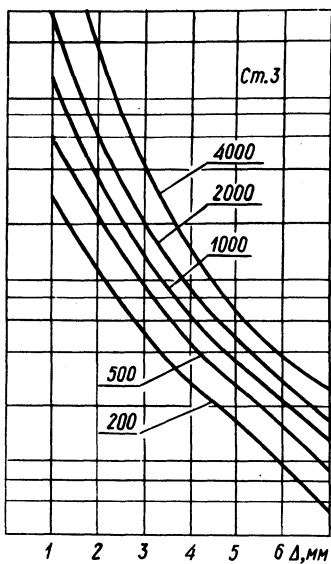
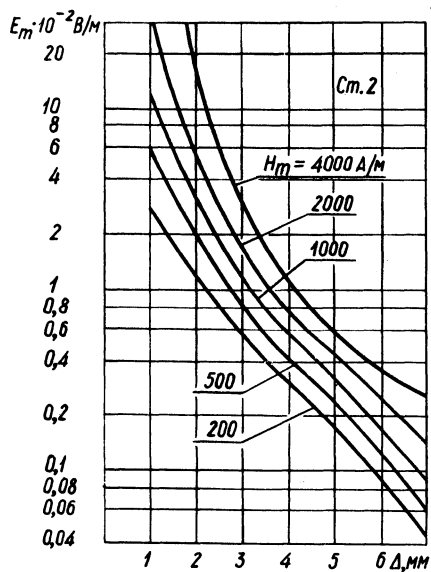


Рис. 3. Зависимость амплитудных значений напряженности электрического поля на наружной поверхности нагревателя от толщины стенки трубы.

Граничные условия (4) определяются из закона полного тока
ка

$$H(0, t) = \frac{\sqrt{2}I}{2\pi R} \sin \omega t = H_m \sin \omega t,$$

где I — ток нагревателя; R — внутренний радиус трубы нагревателя.

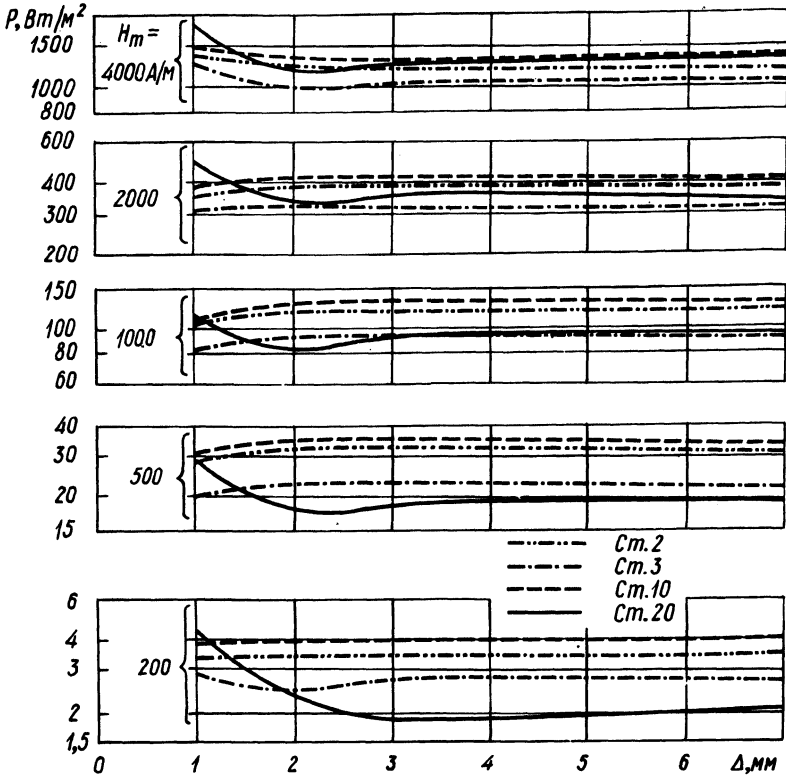


Рис. 4. Зависимость удельной мощности тепловыделения от толщины стенки трубы нагревателя.

Решая уравнение (2) совместно с (3) и (4), найдем распределение напряженности магнитного поля по толщине трубы в функции времени. Расчет напряженности электрического поля производится по выражению:

$$E(z, t) = - \frac{1}{\gamma} \frac{\partial H(z, t)}{\partial z}.$$

Для наружной поверхности трубы $E(\Delta, t)$ представляет собой мгновенное значение напряжения, приходящегося на погонный метр нагревателя, и является основным параметром, определяющим электробезопасность систем обогрева.

Для численного решения уравнения (2) используется неявный метод сеток (метод прогонки) [2]. Расчеты производились для нагревателей с толщиной стенок труб 0,001—0,007 м. Для определения $B(z, t)$ при известных $H(z, t)$ использовались основные кривые намагничивания сталей (Ст. 2, Ст. 3, Ст. 10, Ст. 20).

Результаты расчета приведены на рис. 3, 4. Приведенные на рис. 3 кривые позволяют определить напряжение на наружной поверхности нагревателя в установившемся режиме при заданной его длине или выбрать расстояния между точками заземления трубопровода по условиям электробезопасности.

Как видно из рис. 4, с увеличением толщины труб нагревателей более 0,003 м удельная мощность тепловыделения в них остается практически постоянной.

Из анализа рис. 3 и 4 следует, что при выборе толщины стенки трубы нагревателя определяющим является не удельная мощность тепловыделения, а величина напряжения на наружной поверхности.

Полученные результаты расчета были проверены экспериментально. В лабораторных условиях испытывались нагреватели, выполненные в соответствии с рис. 1. Нагреватели изготовлены из труб указанных марок сталей и имели длину 6 м. Толщина стенок труб различная — от 0,002 до 0,005 м.

Результаты показывают, что расчетные и экспериментальные величины отличаются между собой не более чем на 15%.

Л и т е р а т у р а

1. Патент США, кл. 219—300, № 3629551, заявл. 22.10.1969.
2. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 1—2. М., 1966.