

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.313.282.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ УДАРНОМ УЗЛЕ СКВАЖИННОГО ИМПУЛЬСНОГО ВИБРОИСТОЧНИКА

Б. Ф. Симонов, А. О. Кордубайло, А. Е. Грачев, А. А. Леуткин, Е. М. Позднякова

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: Simonov_bf@mail.ru, Красный проспект, 54, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Исследованы тепловые процессы электромагнитного ударного узла скважинного импульсного виброисточника, работающего в номинальном энергетическом режиме в воздушной среде при естественном охлаждении и различных способах теплопередачи тепловой энергии от катушки к корпусу. Установлена взаимосвязь между температурой катушки и корпуса, внешним охлаждением, продолжительностью включения и тепловым зазором между катушкой и корпусом при заполнении его воздухом или маслом. На основании полученных результатов выполнен расчет продолжительности включения виброисточника при его работе в скважине, когда корпус электромагнитного ударного узла охлаждается проточной водой.

Корпус, боек, катушка, электромагнит, тепловой зазор, средний ток, теплопроводность, теплоотдача

DOI: 10.15372/FTPRPI20220615

Повышение нефтеотдачи пластов (ПНП) — важнейшая задача нефтедобывающего комплекса в настоящее время, поскольку большинство нефтяных месторождений России находятся на III–IV стадии разработки, а требуемые объемы добычи непрерывно растут. Среди различных методов ПНП одним из наиболее перспективных является вибровоздействие на нефтяные пласты, которые помимо самостоятельного применения можно эффективно объединять со многими другими способами (закачки в пласт CO₂ или ПАВ, мицеллярные растворы, имплозия, гидроразрыв пласта и др.) [1, 2].

Существует большое разнообразие конструктивных схем виброисточников, создающих сейсмическое поле в нефтяном пласте и устанавливаемых как на поверхности, так и на уровне пласта. Большой вклад в развитие этих технических комплексов внес Институт горного дела СО РАН [2, 3]. Поверхностные виброисточники, воздействующие на пласт, выполнялись с гидравлическим, индукционным и электромеханическим приводом. Однако все они громоздки и нетехнологичны при применении на промысле. Их эффективность воздействия на пласт существенно снижается из-за потерь энергии сейсмических волн в толще вышележащих пород. Скважинные виброисточники (гидродинамические, пьезокерамические, магнитострикционные, электроразрядные) лишены этого недостатка, но большинство из них излучают высокочастотные

сигналы, воздействующие не на пласт, а на призабойную зону скважин. Последний вариант наиболее эффективен для нефтяного пласта, так как при этом отсутствуют потери в толще вышележащих пород.

Одним из наиболее перспективных решений при создании скважинных виброисточников, воздействующих на пласт, является скважинный электромагнитный импульсный виброисточник, исследованию элементов которого посвящена настоящая статья. Виброисточник включает электромагнитный ударный узел (ЭУУ), два силовых элемента (СЭ) гидравлической системы распора и блок питания и управления (БПУ) [4, 5]. Его конструктивная схема (рис. 1) состоит из электромагнитных катушек 1, 2 прямого и обратного хода соответственно, находящихся в корпусе 3, бойка 4 и двух силовых элементов 5, 6. Силовые элементы преобразуют вертикальные импульсы от ударов бойка в радиальные усилия, передаваемые обсадной колонне скважины (на схеме не показана).

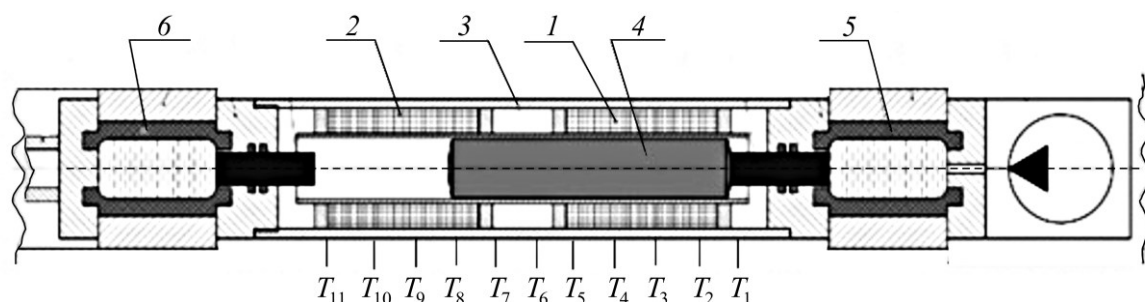


Рис. 1. Конструктивная схема скважинного импульсного виброисточника: $T_1 \dots T_n$ — точки измерения температуры

Возвратно-поступательное движение бойка обеспечивается электромагнитными катушками 1, 2, по которым протекают импульсные токи i_1 , i_2 . Их осциллограммы представлены на рис. 2.

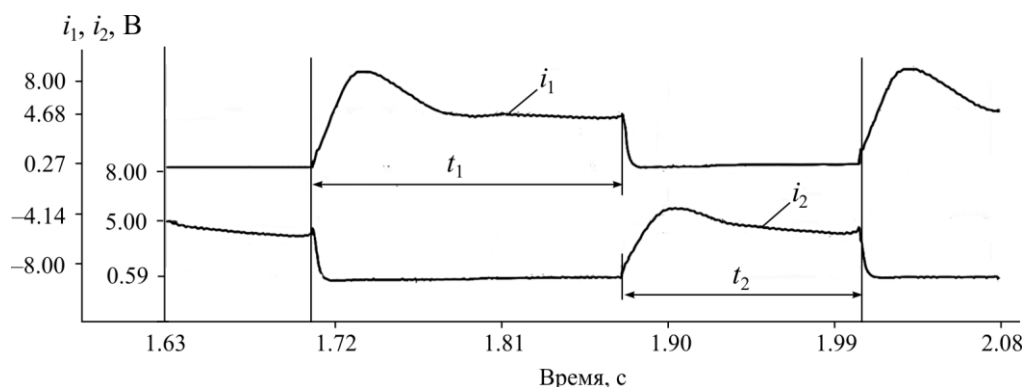


Рис. 2. Осциллограмма рабочего цикла ЭУУ: i_1 , i_2 — токи катушек прямого и обратного хода; t_1 , t_2 — длительность импульсов тока прямого и обратного хода

Для обеспечения надежности и безопасности при работе виброисточника необходимо соблюдать ряд условий, главное из которых — предотвращать перегрев катушек при номинальном режиме работы ЭУУ, который обеспечивается номинальными токами катушек. Цель настоящей статьи — исследование тепловых режимов катушек ЭУУ, работающего в номинальном режиме (при номинальных токах) и установление взаимосвязи температурных показателей с параметрами конструктивного исполнения катушек.

Виброисточник предназначен для работы в нагнетательной скважине. При этом его корпус охлаждается водой, подаваемой по затрубному пространству в пласт. В связи со сложностью проведения тепловых испытаний в реальных условиях они выполнены на стенде в заведомо худших условиях охлаждения катушек по сравнению с реальными. Корпус виброисточника охлаждался естественным воздушным охлаждением при температуре воздуха 10–20 °С. Во время испытаний ЭУУ работал следующим образом: время цикла работы виброисточника 10 мин, из них 3 мин работы и 7 мин остывания, продолжительность включения (ПВ) $\theta = 0.3$. Обеспечивались номинальные средние токи катушек:

$$I_{1cp} = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} i_1(t) dt, \quad I_{2cp} = \frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} i_2(t) dt,$$

где t_1, t_2 — время работы каждой катушки соответственно $I_{1cp} = 27 A$, $I_{2cp} = 24 A$. Одновременно с помощью пирометра фиксировались значения температуры в различных точках $T_1, \dots, T_{11}$ на корпусе ЭУУ в соответствии с рис. 1.

В точках $T_1, \dots, T_5$ фиксировалась температура в катушке прямого хода 1, в точках $T_7, \dots, T_{11}$ — в катушке обратного хода 2. Предполагается, что точки T_3, T_9 , находящиеся в середине катушки прямого и обратного хода, имеют наибольшее значение температуры по сравнению с другими точками.

На рис. 3 приведена конструктивная схема электромагнитов ЭУУ. Оба электромагнита одинаковы по конструкции и размерам, состоят из электромагнитной катушки 1, намотанной на направляющую 2, полюсов 3, корпуса 4. Снаружи катушка покрыта слоем изоляции 5, в качестве которой использован компаунд Силагерм 2113-27 марки А. Габаритные размеры R_1, R_2, R'_2, R_3 определяют радиальные габариты катушки и корпуса; L_k — длина катушки; $\Delta l_1 = R_3 - R'_2$ — зазор 6 между корпусом и наружной поверхностью катушки; $\Delta l_2 = R'_2 - R_2$ — толщина слоя изоляции 5, покрывающего катушку по наружной поверхности.

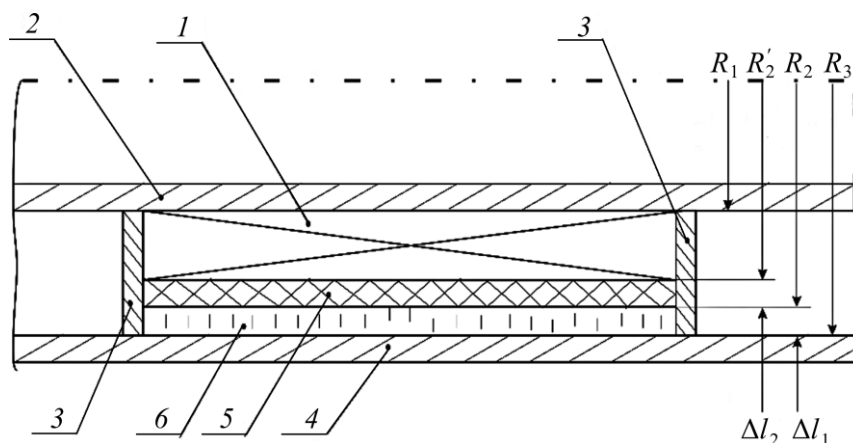


Рис. 3. Конструктивная схема электромагнита ЭУУ

Испытания проводили при заполнении зазора Δl_1 воздухом (вариант 1) и трансформаторным маслом (вариант 2). В обоих случаях конвективное движение в зазоре отсутствовало и передача тепла от катушки к корпусу осуществлялась только за счет теплопроводности материала в зазоре (воздуха или масла).

На рис. 4 показаны экспериментальные зависимости температуры от времени в различных точках на корпусах электромагнитов прямого и обратного хода для различных вариантов теплоотвода от поверхности катушек. Для катушки прямого хода температура на корпусе измерялась в точках T_2, T_3, T_4 , а для катушки обратного хода — в точках T_8, T_9, T_{10} (см. рис. 1). Для каждого варианта теплоотвода от поверхности катушки температуры достигают установившихся значений, а кривые T_3 и T_9 проходят выше зависимостей T_2, T_4 и T_8, T_{10} . Это подтверждает ранее сделанное утверждение, что середина катушки нагревается сильнее.

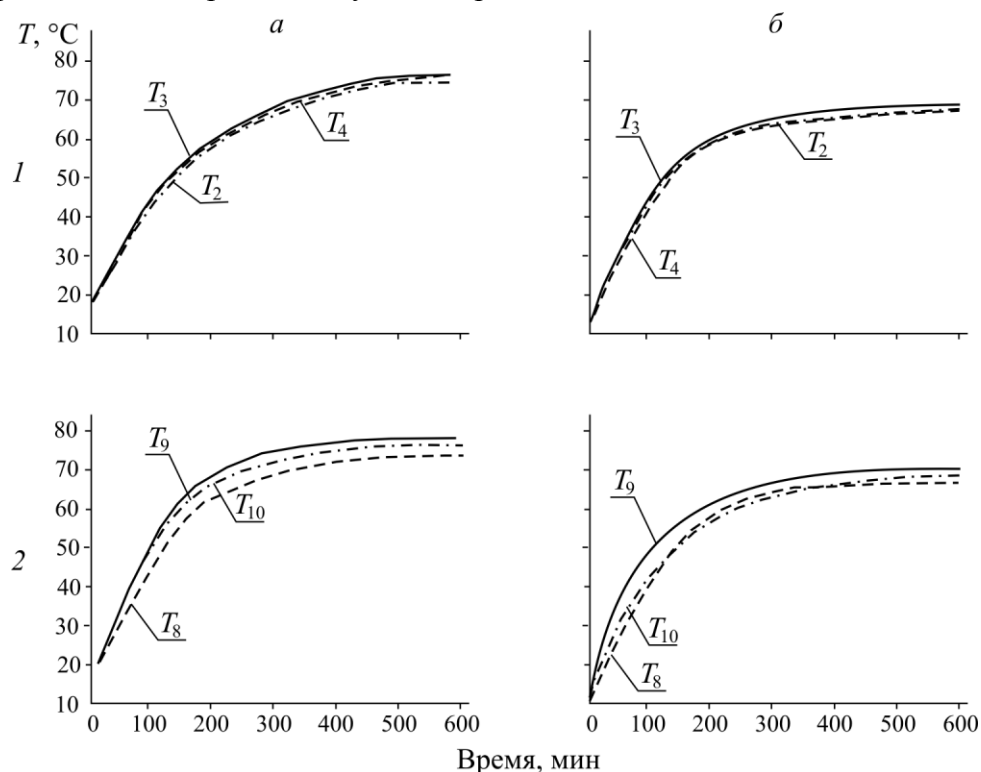


Рис. 4. Зависимости от времени температуры катушки прямого (1) и обратного (2) хода при работе виброисточника в режиме $\theta = 0.3$ при различных вариантах его охлаждения: а — зазор Δl_1 наполнен воздухом; б — зазор Δl_1 наполнен маслом

Рассмотрим процесс теплопередачи от катушки к корпусу и далее в воздушную окружающую среду с естественной конвекцией, исходя из ранее выполненных исследований систем охлаждения электромагнитных машин возвратно-поступательного и ударного действия при следующих допущениях[6]:

- весь тепловой поток из катушки направлен к наружной поверхности корпуса;
- осевые тепловые потоки отсутствуют;
- потери в корпусе отсутствуют; наружная и внутренняя поверхности корпуса имеют одинаковую температуру $t_{\text{кор}}$;

- температура во всем теле катушки одинаковая и равна $t_{\text{кат}}$ — температуре на ее поверхности;

- слой компаунда (Силагерма) нанесен по наружной поверхности катушки и его толщина $\Delta l_2 = R_2' - R_2$; $t_{\text{пов.сил}}$ — температура на поверхности компаунда;

- между наружной поверхностью компаунда и внутренней поверхностью корпуса имеется зазор $\Delta l_1 = R_3 - R_2'$. По условиям эксперимента он может быть либо воздушным, либо маслом наполненным.

Исходя из принятых допущений запишем уравнения теплопередачи от наружной поверхности корпуса в воздушную окружающую среду с естественной конвекцией с температурой t_0 [7–9].

Тепловой поток с поверхности корпуса в воздушную среду с температурой t_0 :

$$P_1 = \alpha S_{\text{пов.кор}} (t_{\text{кор}} - t_0), \quad (1)$$

где α — удельная теплоотдача с поверхности корпуса в окружающую среду, $S_{\text{пов.кор}}$ — боковая поверхность корпуса.

Тепловой поток через слой диэлектрика между внутренней поверхностью корпуса и наружной поверхностью компаунда на катушке:

$$P_2 = \lambda_{\text{д.сл}} S_{\text{пов.кор}} \frac{(t_{\text{пов.сил}} - t_{\text{кор}})}{\Delta l_1}, \quad (2)$$

здесь $\lambda_{\text{д.сл}}$ — удельная теплопроводность диэлектрического слоя между корпусом и наружной поверхностью катушки: $\lambda_{\text{д.сл}} = \lambda_0$ — для воздуха, $\lambda_{\text{д.сл}} = \lambda_{\text{масло}}$ — для масла.

Тепловой поток через слой компаунда на наружной поверхности катушки:

$$P_3 = \lambda_{\text{сил}} S_{\text{пов.кат}} \frac{t_{\text{кат}} - t_{\text{пов.сил}}}{\Delta l_2}, \quad (3)$$

$S_{\text{пов.кат}}$ — боковая поверхность катушки электромагнита ЭУУ.

Потери активной тепловой мощности в катушках электромагнитов прямого и обратного хода при испытаниях виброисточника [4, 5]:

$$P = P_{\text{кат.1}} = P_{\text{кат.2}} = \left(\frac{I_{\text{ср}}}{2} \right)^2 r_{\text{кат}} \theta \quad (I_{\text{ср}} = I_{1\text{ср}} = I_{2\text{ср}}), \quad (4)$$

где $r_{\text{кат}}$ — активное сопротивление катушек; $I_{1\text{ср}}$, $I_{2\text{ср}}$ — средние значения тока катушек.

С учетом принятых допущений для установившегося теплового режима каждой катушки можно записать:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P. \quad (5)$$

Учитывая, что $R_3, R_2, R_2' \gg$ полагаем, что $S_{\text{пов.кор}} = S_{\text{пов.кат}} = S = 2\pi R_3 L_{\text{к}}$. При расчетах принято: $R_3 = 0.0575$ м; $L_{\text{к}} = 0.605$ м; $S = 0.218$ м²; $r_{\text{кат}} = 1.5$ Ом; $\lambda_0 = 3.27 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·°С) — удельная теплопроводность воздуха; $\lambda_{\text{масло}} = 0.127$ Вт/(м·°С) — удельная теплопроводность трансформаторного масла; $\lambda_{\text{сил}} = 1.2$ Вт/(м·°С) — удельная теплопроводность слоя компаунда.

Значение α определяется для каждой конкретной поверхности и условий ее охлаждения. Рассматривая установившийся тепловой режим, при котором выполняется выражение (5), при принятых допущениях для каждой катушки можно найти α , используя выражения (1), (4), и значения установившихся и начальных температур корпуса катушки прямого хода в точке T_3 и катушки обратного хода в точке T_9 (рис. 4) для двух вариантов теплопередачи:

$$\alpha = \frac{P}{S(t_{\text{кор}} - t_0)} = \frac{\left(\frac{I_{\text{ср}}}{2} \right)^2 r_{\text{кат}} \theta}{2\pi R_3 L_{\text{к}} (t_{\text{кор}} - t_0)}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) искомые величины и производя вычисления, получаем значения, приведенные в таблице.

Показатель	Катушка обратного хода		Катушка прямого хода	
	с маслом (вариант 2)	без масла (вариант 1)	с маслом (вариант 2)	без масла (вариант 1)
$P, \text{Вт}$	82.520	82.520	64.800	64.800
$t_{\text{кор}}, ^\circ\text{C}$	71	78	68	76
$t_0, ^\circ\text{C}$	12	18	12	18
$\Delta t = t_{\text{кат}} - t_0, ^\circ\text{C}$	59	60	560	56
$S, \text{м}^2$	0.218	0.218	0.218	0.218
$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	6.400	6.310	5.310	5.310

Анализ температурных зависимостей, представленных на рис. 4, и результатов их обработки, приведенных в таблице, позволяют сделать следующие выводы:

- установившиеся температуры корпуса электромагнитов (рис. 4) каждой катушки при наличии в зазоре Δl_1 масла или воздуха различаются незначительно (на 7–8 $^\circ\text{C}$);

- для каждой катушки в стационарном режиме при установившейся температуре нагрева, когда достигается равенство тепловой мощности, выделяемой в катушках, и мощности, отводимой с наружной поверхности корпуса, величина $\Delta t = t_{\text{кат}} - t_0$ одинакова для вариантов теплоотвода 1 и 2.

Уравнения (1)–(5) устанавливают взаимосвязь между мощностью тепловой энергии P , выделяемой в катушках электромагнитов, температурой в их отдельных точках и геометрическими параметрами электромагнитов виброисточника (тепловыми зазорами $\Delta l_1, \Delta l_2$). Интерес представляет взаимосвязь между установившимися значениями температуры корпуса $t_{\text{кор}}$ и температурой обмоточного провода катушки $t_{\text{кат}}$ без использования мощности тепловых потерь, выделяемых в катушке для каждого из двух вариантов теплоотвода от поверхности катушки.

Например, для корпуса, наполненного маслом, из уравнений (1), (2), (5) получим

$$\alpha S_{\text{пов.кор}} (t_{\text{кор}} - t_0) = \lambda_{\text{мас}} S_{\text{пов.кор}} \frac{t_{\text{пов.сил}} - t_{\text{кор}}}{\Delta l_1},$$

откуда

$$t_{\text{пов.сил}} = t_{\text{кор}} + \frac{\alpha \Delta l_1}{\lambda_{\text{мас}}} (t_{\text{кор}} - t_0). \quad (7)$$

Аналогичным образом из (2), (3), (5) находим

$$\lambda_{\text{мас}} S_{\text{пов.кор}} \frac{(t_{\text{пов.сил}} - t_{\text{кор}})}{\Delta l_1} = \lambda_{\text{сил}} S_{\text{пов.кат}} \frac{t_{\text{кат}} - t_{\text{пов.сил}}}{\Delta l_2}.$$

Тогда с учетом (7) запишем:

$$t_{\text{кат}} = t_{\text{кор}} + \left(1 + \frac{\lambda_{\text{мас}} \Delta l_2}{\lambda_{\text{сил}} \Delta l_1} \right) \frac{\alpha \Delta l_1}{\lambda_{\text{мас}}} (t_{\text{кор}} - t_0) \quad (8)$$

или

$$\frac{t_{\text{кат}} - t_{\text{кор}}}{t_{\text{кор}} - t_0} = \left(1 + \frac{\lambda_{\text{мас}} \Delta l_2}{\lambda_{\text{сил}} \Delta l_1} \right) \frac{\alpha \Delta l_1}{\lambda_{\text{мас}}} . \quad (9)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} V(\Delta l_1, \Delta l_2) &= \frac{t_{\text{кат}} - t_{\text{кор}}}{t_{\text{кор}} - t_0} \text{ — для варианта 1,} \\ M(\Delta l_1, \Delta l_2) &= \frac{t_{\text{кат}} - t_{\text{кор}}}{t_{\text{кор}} - t_0} \text{ — для варианта 2.} \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда аналогичная система уравнений для варианта с воздухом наполненным корпусом примет вид:

$$t_{\text{кат}} = t_{\text{кор}} + \left(1 + \frac{\lambda_0 \Delta l_2}{\lambda_{\text{сил}} \Delta l_1} \right) \frac{\alpha \Delta l_1}{\lambda_0} (t_{\text{кор}} - t_0), \quad (11)$$

$$V(\Delta l_1, \Delta l_2) = \left(1 + \frac{\lambda_0 \Delta l_2}{\lambda_{\text{сил}} \Delta l_1} \right) \frac{\alpha \Delta l_1}{\lambda_0}. \quad (12)$$

Для каждой из катушек прямого и обратного хода получим зависимости $t_{\text{кат}}, M, V$ как функции $\Delta l_1, \Delta l_2$ для маслonaполненного (8), (9) и воздухом наполненного (11), (12) корпусов электромагнитов виброисточника при изменении $\Delta l_1, \Delta l_2$ в следующих диапазонах: $\Delta l_1 = (0.5 - 2.0) \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta l_2 = (5.5 - 4.0) \cdot 10^{-3}$ м при выполнении условия $\Delta l_1 + \Delta l_2 = \text{const} = 6 \cdot 10^{-3}$ м. Примем для катушки прямого хода: в случае воздухом наполненного корпуса $\alpha = 6$, $t_{\text{кор}} = 76^\circ\text{C}$, $t_0 = 18^\circ\text{C}$; в случае маслonaполненного корпуса $\alpha = 6$, $t_{\text{кор}} = 68^\circ\text{C}$, $t_0 = 12^\circ\text{C}$. Для катушки обратного хода: в случае воздухом наполненного корпуса $\alpha = 6$, $t_{\text{кор}} = 78^\circ\text{C}$, $t_0 = 18^\circ\text{C}$; в случае маслonaполненного корпуса $\alpha = 6$, $t_{\text{кор}} = 71^\circ\text{C}$, $t_0 = 12^\circ\text{C}$.

Из полученных зависимостей следует, что во всем диапазоне технологических зазоров $\Delta l_1 = (0.5 - 2.0) \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta l_2 = (5.5 - 4.0) \cdot 10^{-3}$ м при $\Delta l_1 + \Delta l_2 = \text{const} = 6 \cdot 10^{-3}$ м и охлаждении корпуса воздухом при ПВ $\theta = 0.3$ с температурой в диапазоне $12 \leq t_0 < 18^\circ\text{C}$ при его естественной конвекции:

- для катушки прямого хода установившаяся температура $t_{\text{кат}}$ и отношение $(t_{\text{кат}} - t_{\text{кор}}) / (t_{\text{кор}} - t_0)$ лежат в диапазонах:

$$\left. \begin{aligned} 83 < t_{\text{кат}} < 98^\circ\text{C} \\ 0.05 < V < 0.120 \end{aligned} \right\} \text{ в зазоре } \Delta l_1 \text{ — воздух ,}$$

$$\left. \begin{aligned} 72 < t_{\text{кат}} < 75^\circ\text{C} \\ 0.15 < M < 0.40 \end{aligned} \right\} \text{ в зазоре } \Delta l_1 \text{ — масло.}$$

- для катушки обратного хода температура $t_{\text{кат}}$ и отношение $(t_{\text{кат}} - t_{\text{кор}}) / (t_{\text{кор}} - t_0)$ лежат в диапазонах:

$$\left. \begin{aligned} 85 < t_{\text{кат}} < 100^\circ\text{C} \\ 0.05 < V < 0.12 \end{aligned} \right\} \text{ в зазоре } \Delta l_1 \text{ — воздух ,}$$

$$\left. \begin{array}{l} 73 < t_{\text{кат}} < 78 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0.15 < M < 0.40 \end{array} \right\} \text{ в зазоре } \Delta l_1 \text{ — масло.}$$

Если сравнить зависимости $V(\Delta l_1, \Delta l_2)$ и $M(\Delta l_1, \Delta l_2)$, то можно видеть, что они практически совпадают:

$$M(\Delta l_1, \Delta l_2) \approx V(\Delta l_1, \Delta l_2).$$

Это объясняется тем, что условия нагрева и охлаждения катушек прямого и обратного хода одинаковые.

Зависимости $M(\Delta l_1, \Delta l_2)$ и $V(\Delta l_1, \Delta l_2)$, полученные для $\theta = 0.3$ при охлаждении воздухом в режиме естественной конвекции, позволяют выполнить прогноз продолжительности включения θ при других режимах и способах охлаждения, например водяного при известном коэффициенте теплоотдачи α .

Для этого нужно для номинального энергетического режима решить совместно уравнения (1), (5) и выполнить ряд преобразований. Приравнявая (1) и (5) для любой из катушек, получим:

$$t_{\text{кор}} - t_0 = \frac{\left(\frac{I_{\text{ср}}}{2}\right)^2 r_{\text{кат}} \theta}{\alpha S_{\text{пов.кор}}}. \quad (13)$$

Используя выражения (13), (10), находим:

$$(t_{\text{кат}} - t_{\text{кор}}) = M(t_{\text{кор}} - t_0) = M \frac{\left(\frac{I_{\text{ср}}}{2}\right)^2 r_{\text{кат}} \theta}{\alpha S_{\text{пов.кор}}} \quad \text{или} \quad t_{\text{кат}} = t_{\text{кор}} + M \frac{\left(\frac{I_{\text{ср}}}{2}\right)^2 r_{\text{кат}} \theta}{\alpha S_{\text{пов.кор}}}. \quad (14)$$

Подставляя (13) в (14), имеем для маслonaполненного корпуса

$$t_{\text{кат}} = \frac{(t_{\text{кат}} - t_0) \alpha S_{\text{пов.кор}}}{(M + 1) \left(\frac{I_{\text{ср}}}{2}\right)^2 r_{\text{кат}}}.$$

Если в этом выражении для ЭУУ при номинальном токе при $I_{\text{ср}} = 27 \text{ А}$, $r_{\text{кат}} = 1.5 \text{ Ом}$, $S_{\text{пов}} = 0.218 \text{ м}^2$, $M = 0.15$ и начальной температуре охлаждающей среды $t_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ задать $t_{\text{кат}} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (класс изоляции Н) и выбрать охлаждение водой со скоростью 4 м/с ($\alpha > 18 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$), то $\theta = 1.27 > 1.00$.

Это значит, что продолжительность включения θ может быть больше 1, т. е. виброисточник в скважине с водяным охлаждением сможет работать непрерывно.

ВЫВОДЫ

При заданном энергетическом режиме работы виброисточника в установившемся тепловом режиме разница температуры между корпусом и окружающей средой $\Delta t = t_{\text{кор}} - t_0$ одинакова для исследованных вариантов теплоотвода между корпусом виброисточника и поверхностью катушки.

Виброисточник с технологическими зазорами $\Delta l_1 = (0.5 - 2.0) \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta l_2 = (5.5 - 4.0) \cdot 10^{-3}$ м при работе в режиме номинальных токов с воздушным естественным охлаждением корпуса может обеспечивать продолжительность включения θ не более 0.3–0.4. При этом нагрев катушки не будет превышать $t_{\text{кат}} \leq 100^\circ\text{C}$, что позволяет использовать обмоточный провод с классом изоляции А и выше. При водяном охлаждении в нагнетательной скважине номинальный энергетический режим может обеспечить продолжительность включения до $\theta = 1$, т. е. виброисточник может работать непрерывно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыбленко В. П., Марчуков Е. Ю., Туфанов И. А., Шарифуллин Р. Я., Евченко В. С. Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с трудноизвлекаемыми запасами. Кн.1. — М.: РАЕН, 2012. — 338 с.
2. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010. — 404 с.
3. Курленя М. В., Пеньковский В. И., Савченко А. В., Евстигнеев Д. С., Корсакова Н. К. Развитие метода повышения притока нефти к скважине в процессе разработки месторождения // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 62–71.
4. Кордубайло А. О., Симонов Б. Ф. Исследование конструкций скважинного электромагнитного импульсного виброисточника // ФТПРПИ. — 2020. — № 5. — С. 146–153.
5. Симонов Б. Ф., Кордубайло А. О., Нейман В.Ю., Полищук А. Е. Рабочие процессы в импульсном линейном приводе скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 71–78.
6. Мирошниченко А. Н., Шленкин О. Г. Исследование теплоотдачи корпусных деталей электромагнитных машин ударного действия // Электрические машины ударного действия. — Новосибирск: Наука, 1969. — С. 53–64.
7. Жуковский В. С. Основы теории теплопередачи. — Л.: Энергия, 1969. — 224 с.
8. Залесский А. М., Кукеков Г. А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. — Л.: Энергия, 1967. — 380 с.
9. Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 256 с.

Поступила в редакцию 21/IX 2022

После доработки 29/IX 2022

Принята к публикации 24/XI 2022